

Aplicación de una fuente de calor móvil en la simulación de PBF-LB/M

Sordoni, Francisco

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
29 de septiembre de 2025

Aplicación de una fuente de calor móvil en la simulación de PBF-LB/M

Sordoni, Francisco

Proyecto Final de Ingeniería Mecánica presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Directores:
Ing. Pedro Sismondi – Ing. Guillermo Rodríguez – Ing. Juan Sismondi

Universidad Nacional de Rosario
Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Escuela de Ingeniería Mecánica
Rosario, Argentina
29 de septiembre de 2025

Dedicatoria

A toda mi familia y amigos,

que siempre me acompañan,

Gracias.

Agradecimientos

Quisiera, en primer lugar, agradecer a mi famila por su apoyo incondicional y el haberme dado la oportunidad de estudiar, crecer y así perseguir mis metas.

Quisiera también agradecer a mis amigos y compañeros de estudio que me acompañaron en cada paso de este largo y tan valioso camino.

Quisera también agradecer a Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario por brindarme la oportunidad de formarme como profesional y por herramientas que me brindó durante mi carrera.

De la misma manera, es importante también agradecer a la Universidad Técnica de Múnich, al Instituto de Máquinas-Herramienta y Ciencias Empresariales de la misma y al tutor del proyecto que pude llevar a cabo durante el intercambio internacional , que pude realizar gracias al Servicio Alemán de Intercambio Académico y Secretaría de Educación de Argentina, Hannes Panzer.

Resumen

La manufactura aditiva ha experimentado un crecimiento significativo debido a los avances tecnológicos, particularmente en la fusión de lechos de polvo de metales con rayos láser. Para mejorar la implementación de este proceso, es crucial predecir posibles defectos basándose en los parámetros de manufactura y la geometría de las piezas. Simular el proceso de manufactura utilizando el método de elementos finitos es un enfoque efectivo, pero las simulaciones detalladas de la evolución de temperatura requieren considerable potencia computacional. Para abordar esto, se propone un enfoque de submodelado para la simulación térmica. El proceso comienza con una simulación global para identificar regiones propensas a fracturas, seguida de un enfoque en estas áreas utilizando fuentes de calor móviles para análisis detallado. Los resultados son prometedores, demostrando el potencial de este enfoque para predecir defectos durante el proceso de fusión de lecho de polvo. Sin embargo, los desafíos en la implementación resaltan la necesidad de mayor desarrollo y validación.

Palabras clave: submodelado, manufactura aditiva, condición de borde, malla

Abstract

Additive manufacturing has experienced significant growth due to technological advancements, particularly in the powder bed fusion of metals with laser beams. To improve the implementation of this process, it is crucial to predict potential defects based on manufacturing parameters and the geometry of the parts. Simulating the manufacturing process using the finite element method is an effective approach, but detailed temperature evolution simulations require considerable computing power. To address this, a submodeling approach for thermal simulation is proposed. The process begins with a global simulation to identify regions prone to fracture, followed by a focus on these areas using mobile heat sources for detailed analysis. The outcomes are promising, demonstrating the potential of this approach in predicting defects during the powder bed fusion process. However, challenges in implementation highlight the need for further development and validation.

Keywords: submodel, additive manufacturing, boundary condition, mesh

Índice

1. Introducción **14**

1.1. Motivación 14

1.2. Objetivo del trabajo 14

1.3. Estructura de la Tesis 14

2. Conceptos básicos y definiciones **16**

2.1. Powder Bed Fusion using a Laser Beam 16

2.1.1. Descripción 16

2.1.2. Proceso de manufactura 17

2.1.3. Defectos 18

2.2. Método de elementos finitos 19

2.2.1. Descripción 19

2.2.2. Condiciones de contorno 21

2.2.3. Características de la malla 23

2.2.4. Herramientas de software empleadas 26

3. Estado del Arte **29**

3.1. Descripción General 29

3.2. Simulación microscópica 30

3.3. Simulación mesoscópica 31

3.4. Simulación macroscópica 32

3.4.1. Sin refinamiento de malla 33

3.4.2. Con refinamiento de malla 34

3.5. Valor agregado pretendido 36

4. Enfoque Metodológico **37**

4.1. Descripción General 37

4.1.1. Enfoque de submodelado 37

4.1.2. Proceso de simulación 37

4.2. Extracción y Generación de Malla 40
4.2.1. Extracción de Región 40
4.2.2. Generación de Malla 41
4.3. Condiciones de Contorno 48
4.3.1. Descripción General 48
4.3.2. Flujo de Calor 49
4.3.3. Generación del Archivo de Entrada 51

5. Resultados y Discusión **53**
5.1. Simulación Global 53
5.2. Extracción y Generación de Malla 54
5.3. Condiciones de Contorno 57

6. Conclusiones y Perspectivas **66**
6.1. Conclusiones 66
6.2. Perspectivas 66

7. Figuras de resultados del dominio local **68**

8. Archivos de resultado **76**

Referencias **77**

Índice de figuras

1. Esquema del proceso Powder Bed Fusion using a Laser Beam (PBF-LB/M) [8] 17
2. Esquema del tramado de relleno y contorno de PBF-LB/M (basado en [6]) . . . 18
3. Esquema de los parámetros de PBF-LB/M (basado en [2]) 19
4. Estructura de la aplicación del Método de Elementos Finitos [14] 20
5. Esquema de aplicación de condiciones de contorno en un problema de transferencia de calor (basado en [16]) 22
6. Diagrama TONTI del modelo de transferencia de calor (basado en [20]) 23
7. Discretización del dominio (basado en [16]) 23
8. Comparación de una malla estructurada y una no estructurada [21] 24
9. Elementos tetraédricos [17] 24
10. Refinamiento localizado de malla: a) malla sin refinamiento b) malla con refinamiento localizado de malla 26
11. Esquema de las mallas resultantes antes y después de aplicar refinamiento-h: a) malla original b) después de aplicar subdivisión de elementos c) después de aplicar remallado d) después de aplicar refinamiento-r (basado en [15]) 27
12. Interfaz gráfica de usuario de Calculix Graphix [25] 28
13. Esquema de solidificación del baño de fusión [28] 30
14. Comparación esquemática de resultados de métodos de simulación [28] 31
15. Simulación del baño de fusión: a & b desprecian la evaporación mientras c & d la toman en cuenta. [32] 32
16. Mallas de elementos finitos; a) malla con mallado dinámico b) vista superior de malla con mallado dinámico c) vista superior de malla estática con la densidad de la zona local (basado en [39]) 35
17. Representación del enfoque de submodelo. a) Muestra el sistema real a ser simulado. b) Muestra el modelo global a ser simulado y la ubicación de la región de interés. c) Muestra la región de interés remallada con una malla más fina (basado en [40]) 35
18. Esquema de las etapas del proceso para aplicar el enfoque de submodelado para la simulación de microestructura 38
19. Esquema de la geometría de la fuente de calor Goldak (basado en [38]) 39
20. Esquema del flujo de información en el proceso de simulación 39
21. Nodos donde se superó el umbral de daño por fractura y regiones generadas . . 40
22. Cara del elemento tetraédrico con tamaño máximo de elemento 42
23. Región con grilla de nodos generada 42
24. Numeración de nodos del elemento hexaédrico 43

25. Descomposición de hexaedro en 5 elementos tetraédricos . . . 44
26. Problem with neighouring hexaedron decomposed equally . . . 45
27. Hexaedron decomposition in 5 tetraedral elements . . . 46
28. Final decomposition of hexaedral elements . . . 47
29. Definición del elemento tetraédrico . . . 48
30. Esquema de la activación de capas a través de la simulación del proceso . . . 49
31. Ejemplo de definición de condiciones de contorno de submodelo en archivo de entrada . . . 50
32. Flujo de información entre simulaciones . . . 50
33. Comparación de escala del tamaño de elemento de simulación y simulación local 52
34. Ejemplo de definición de condiciones de contorno de submodelo CFLUX en archivo de entrada . . . 52
35. Esquemas de las geometrías utilizadas para las simulaciones . . . 53
36. Malla del modelo global . . . 54
37. A) Resultados del indicador de daño para la simulación A con la anotación mostrando el valor máximo B) Resultados del indicador de daño para la simulación B con la anotación mostrando el valor máximo . . . 55
38. Superposición del modelo global y la región sugerida por el programa . . . 56
39. Superposición del modelo global y la región utilizada . . . 57
40. Malla de la región de interés y descomposición del primer hexaedro en cinco tetraédricos . . . 58
41. Resultados de temperatura [Kelvin] para la potencia de 285 W . . . 59
42. Resultados de temperatura [Kelvin] para la potencia de 407 W . . . 60
43. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 285 W en la primera simulación local . . . 61
44. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la primera simulación local . . . 61
45. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 285 W en la segunda simulación local . . . 62
46. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la segunda simulación local . . . 62
47. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la primera simulación local sección transversal . . . 63
48. Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la segunda simulación local sección transversal . . . 64
49. Resultados de temperatura [Kelvin] para el modelo de fuente de calor Goldak implementado por [38] [38] . . . 65
50. Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 285 W . . . 68

51. Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W 69

52. Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W con la malla de Hypermesh 69

53. Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W con el modelo de fuente de calor previo 70

54. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la primera simulación local 70

55. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la primera simulación local 71

56. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la segunda simulación local 71

57. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local 72

58. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local con malla de Hypermesh 72

59. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la primera simulación local 73

60. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la primera simulación local, sección transversal 73

61. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la segunda simulación local, sección transversal 74

62. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local, sección transversal 74

63. Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local con malla de Hypermesh, sección transversal 75

Índice de cuadros

1. Número de nodos y elementos y resultados de energía con error con elementos 2D de tres nodos (basado en [15]) 25

2. Potencia del láser y la temperatura utilizada para la exposición flash. 54

3. Parámetros a, b, c, y eficiencia η para las potencias láser seleccionadas 57

4. Parámetros a, b, c, y eficiencia η empleados por [38] 63

Lista de abreviaciones

- **AM** : Manufactura aditiva
- **PBF-LB/M** : Powder Bed Fusion using a Laser Beam
- **FEM** : Método de elemento finito
- **CAD** : Diseño asistido por computadora
- **ROI** : Región de interés
- **BVP** : Boundary Value Problem
- **GWQ** : Fuente de calor Goldak
- **CTI** : Fuente de calor de modelo de tiempo característico
- **BC** : Condición de borde
- **GdL** : Grado de libertad
- **FTFM** : Full Thermal Full Mechanical
- **MH** : Fuente de calor movil

1. Introducción

En este próximo capítulo, se examinará cuidadosamente la motivación detrás de esta Tesis de Grado y sus objetivos. Además, se presentará un esquema claro de la estructura del documento.

1.1. Motivación

Durante las últimas décadas, los componentes producidos mediante Manufactura aditiva (AM) se han expandido desde ser utilizados principalmente para prototipado rápido hasta reemplazar piezas críticas fabricadas con métodos convencionales en diversas industrias [1]. Este cambio se debe a las ventajas que ofrece AM en comparación con los procesos de manufactura tradicionales. Permite la producción de formas complejas cercanas a la forma final (*near net shape*), minimizando la necesidad de herramientas y reduciendo los tiempos de entrega [2]. Además, AM genera menos desperdicios de material que los métodos tradicionales y permite la reutilización de la materia prima, lo que ayuda a reducir los costos de materiales [2, 3]. Entre las diversas técnicas de AM, PBF-LB/M es uno de los métodos más comúnmente utilizados para procesar metales. PBF-LB/M utiliza un rayo láser para fundir y fusionar capas de polvo, creando la forma deseada [4].

Sin embargo, para implementar adecuadamente PBF-LB/M en procesos de manufactura es necesario predecir el impacto que los parámetros del proceso pueden tener en la pieza final [2]. Dado los altos gradientes de temperatura en las piezas durante el proceso de impresión, se pueden encontrar tensiones residuales en la pieza final, lo que puede llevar a la aparición de grietas, afectando las propiedades mecánicas de la pieza [1].

La predicción de grietas se puede realizar utilizando una simulación básica a escala de pieza. Sin embargo, se requiere un método más preciso para evaluar la microestructura con precisión, la cual influye en el comportamiento de agrietamiento bajo diferentes condiciones de procesamiento. Este enfoque minucioso típicamente conlleva mayores costos computacionales. Por ende, es crucial dividir el modelo general y aplicar esta técnica detallada solo a áreas específicas. Este enfoque mejora la calidad de los resultados mientras mantiene gastos computacionales coherentes.

1.2. Objetivo del trabajo

Este trabajo presenta un método para integrar una fuente de calor móvil en un submodelo que se enfoca en áreas específicas de un modelo global donde es más probable que se desarrollen grietas. El objetivo es generar resultados de simulación que reflejen con precisión el impacto del aporte de calor durante el proceso de manufactura mientras se mantienen los costos computacionales razonables. Al implementar esta estrategia, se vuelve posible predecir mejor la formación de grietas debido a cambios microestructurales y tensiones residuales en la pieza, facilitando así la producción exitosa a la primera de componentes PBF-LB/M.

1.3. Estructura de la Tesis

Este trabajo introduce la implementación del método de submodelado para simulación térmica de piezas manufacturadas utilizando PBF. El Sección 2 presenta el conocimiento básico ne-

cesario para abordar el contenido cubierto a lo largo del documento. El Sección 3 luego presenta el estado del arte, examinando desarrollos actuales relacionados con el tema e identificando la posición de este trabajo en relación con ellos. El Sección 4 presenta la metodología utilizada para abordar las tareas establecidas para este trabajo, y los resultados de esta metodología se analizan en el Sección 5. Finalmente, el Sección 6 presenta las conclusiones del trabajo y posibles investigaciones como resultado de sus hallazgos.

2. Conceptos básicos y definiciones

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar conocimientos fundamentales sobre los temas tratados en esta tesis. La sección sobre PBF-LB/M describe los conceptos básicos de AM, seguida de una exploración del método específico y los defectos potenciales que pueden ocurrir en las piezas producidas por PBF-LB/M. Por último, la sección sobre Método de elemento finito (FEM) explica los conceptos fundamentales del método y las herramientas utilizadas para esta investigación.

2.1. Powder Bed Fusion using a Laser Beam

Esta sección comienza con una introducción a AM, destacando sus características y luego proporciona una descripción detallada del método PBF-LB/M. Posteriormente describe el proceso de PBF-LB/M y los defectos potenciales que pueden ocurrir en las piezas producidas mediante este método.

2.1.1. Descripción

Inicialmente denominada "prototipado rápido", AM fue introducida por primera vez en 1987 [5]. AM implica crear una pieza a través de un proceso por capas [5], lo que significa que la pieza se construye uniendo numerosas capas entre si. Este método permite al usuario producir piezas complejas sin la necesidad de herramientas costosas [6].

Según [5], el proceso para AM comienza con la definición de la pieza a fabricar en un archivo Diseño asistido por computadora (CAD). Además, una de las principales características del proceso AM es que el usuario puede ir directamente del archivo CAD a una pieza física. La pieza en ese archivo es luego dividida en capas (proceso denominado *slicing*), al final de este proceso se genera un conjunto de datos en el cual se almacena la información del contorno (plano x-y, Figura 1), el espesor de capa (eje z) y el número de capa (altura en el eje z), ya que la dirección de construcción es paralela al eje z y perpendicular a la plataforma de construcción. Este conjunto de datos se utiliza como entrada para la impresora 3D, que genera repetidamente cada capa hasta que la pieza ha sido completada.[5]

PBF-LB/M es uno de los métodos más prominentes de AM para metales, implica fundir polvo de aleación metálica con un haz láser en un patrón preciso, construyendo el objeto capa por capa [7]. Según [2], el objetivo es crear piezas con una densidad mayor al 99 %, es decir, piezas completamente densas. La Figura 1 muestra un esquema de una máquina PBF-LB/M durante un proceso de fabricación; allí, los componentes principales de la máquina están señalizados.

Según [6], las ventajas de este método, comparado con la manufactura tradicional, incluyen:

- producción de forma casi final sin la necesidad de herramientas costosas o post-procesamiento,
- alta tasa de utilización del material,
- alta flexibilidad de producción,
- alta libertad de diseño,
- fabricación con geometrías basadas en retículas, permitiendo piezas livianas.

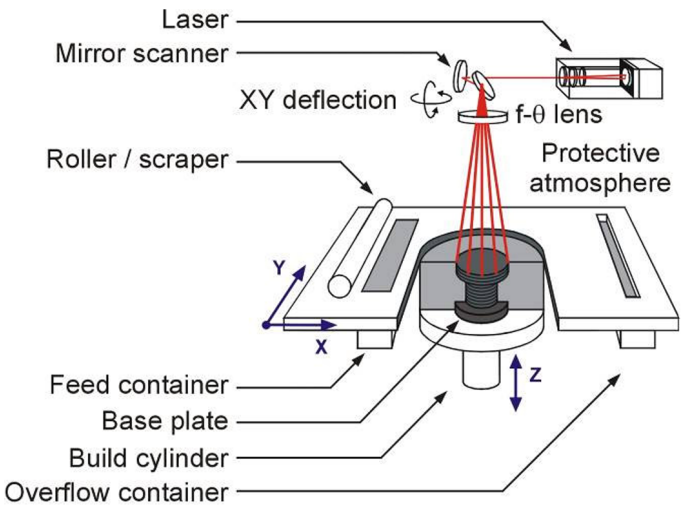


Figura 1: Esquema del proceso PBF-LB/M [8]

2.1.2. Proceso de manufactura

La cadena del proceso de PBF-LB/M comienza con el CAD de la pieza, seguido del *slicing* para preparar el modelo para la manufactura aditiva [7]. La plataforma de construcción se fija de manera segura, proporcionando una base estable sobre la cual la pieza será construida capa por capa [2].

Para proceder con el proceso de fabricación, es esencial desplazar el oxígeno de la cámara de construcción, creando una atmósfera inerte compuesta predominantemente por nitrógeno y argón [9]. Una primera capa de polvo metálico se distribuye uniformemente sobre la plataforma de construcción [2]. Este polvo se precalienta a temperaturas por debajo de su punto de fusión para mejorar la unión, minimizar la distorsión en la pieza final y reducir las demandas colocadas sobre el sistema láser [4].

Para fundir selectivamente el polvo metálico y lograr la geometría de pieza deseada, un rayo láser de alta intensidad es emitido y dirigido precisamente por un sistema de espejos, la Figura 2 muestra un esquema donde se representa el movimiento del rayo para el escaneo de contorno y el tramado de relleno [2]. Al completar cada capa, la cama de impresión se baja para acomodar una nueva capa de polvo, que posteriormente se distribuye sobre la capa previamente formada [4]. El polvo excedente se deja caer en un contenedor de desborde. Este proceso de apilado continúa hasta que la pieza está completamente construida [4]. Una representación de las partes mencionadas en el proceso de fabricación para PBF-LB/M puede verse en la Figura 1.

Una vez que la pieza ya se fabricó, debe enfriarse, y cualquier polvo residual debe ser removido, típicamente logrado a través de limpieza manual con un cepillo o utilizando un sistema de aspiración [5]. Después de esto, se implementa un tratamiento térmico para aliviar las tensiones residuales [7].

Posteriormente, la pieza se separa de la plataforma de construcción, empleando principalmente aserrado o mecanizado por descarga eléctrica, siendo este último el método preferido [7]. Finalmente, la pieza puede someterse a tratamientos térmicos adicionales para obtener las propiedades mecánicas deseadas y puede requerir mecanizado según sea necesario [7].

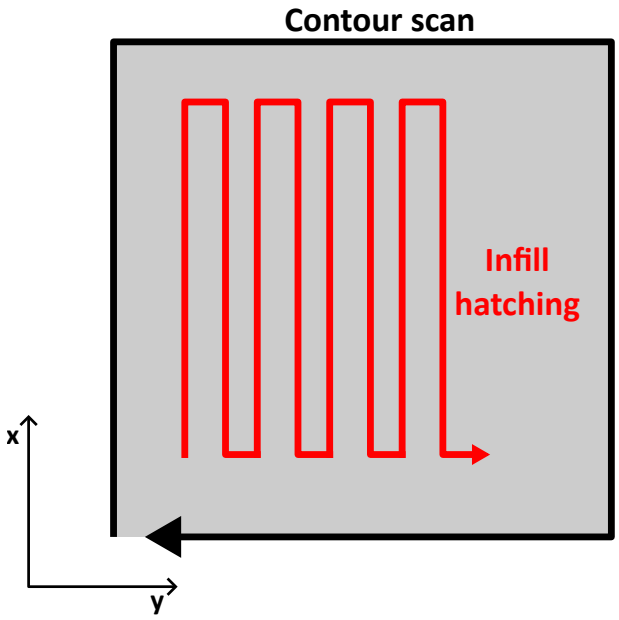


Figura 2: Esquema del tramado de relleno y contorno de PBF-LB/M (basado en [6])

2.1.3. Defectos

PBF-LB/M es un método de producción único que ofrece varias ventajas sobre los procesos más convencionales. Sin embargo, para aprovechar completamente los beneficios de esta tecnología, es esencial entender cómo diferentes parámetros del proceso pueden influir en la calidad del producto final para evitar defectos en la pieza final. Según [1], los problemas clave relacionados con PBF-LB/M incluyen la pérdida de elementos de aleación debido a la vaporización, porosidad, y defectos que surgen de la fusión insuficiente, rugosidad superficial, e instancias de agrietamiento y delaminación.

Un aspecto notable de PBF-LB/M son los gradientes térmicos pronunciados que ocurren, llevando a altas tensiones residuales en la pieza final [7]. Dadas las condiciones en las que tiene lugar un proceso PBF-LB/M, no hay suficiente tiempo para homogeneizar las distribuciones de energía y temperatura a través del lecho de polvo [6]. Después de que se alcanza la temperatura de fusión y el haz láser deja esa posición, la piscina de fusión comienza a solidificarse. Cómo se desarrolla este proceso es crucial para las propiedades mecánicas de la pieza y la posibilidad de que aparezcan defectos [1, 6]. Dos tipos diferentes de grietas pueden presentarse en PBF-LB/M, grietas frías y calientes, siendo las primeras las más comunes y causadas por la tensión residual en la pieza fabricada [2].

Durante el proceso PBF-LB/M, el material se expone a calentamiento rápido por encima de su punto de fusión, seguido de enfriamiento rápido cuando el haz láser deja esa zona. Esto es seguido por numerosos ciclos térmicos donde esa zona se ve afectada por la siguiente capa siendo generada, resultando en ciclos de calentamiento y enfriamiento rápidos con amplitud decreciente ya que las nuevas capas están más alejadas de la capa original en la dirección de construcción (ver Figura 1). [2, 6]

El gradiente de temperatura es un factor clave a estudiar para predecir mejor la presencia de defectos en piezas construidas a través de PBF-LB/M [10]. Según [11], predecir con preci-

sión la distribución de temperatura durante el proceso de fabricación es crucial para entender la aparición de defectos como deformaciones y tensiones residuales. Como menciona [12], es esencial conocer tanto la evolución del campo de temperatura como los valores específicos de temperatura.

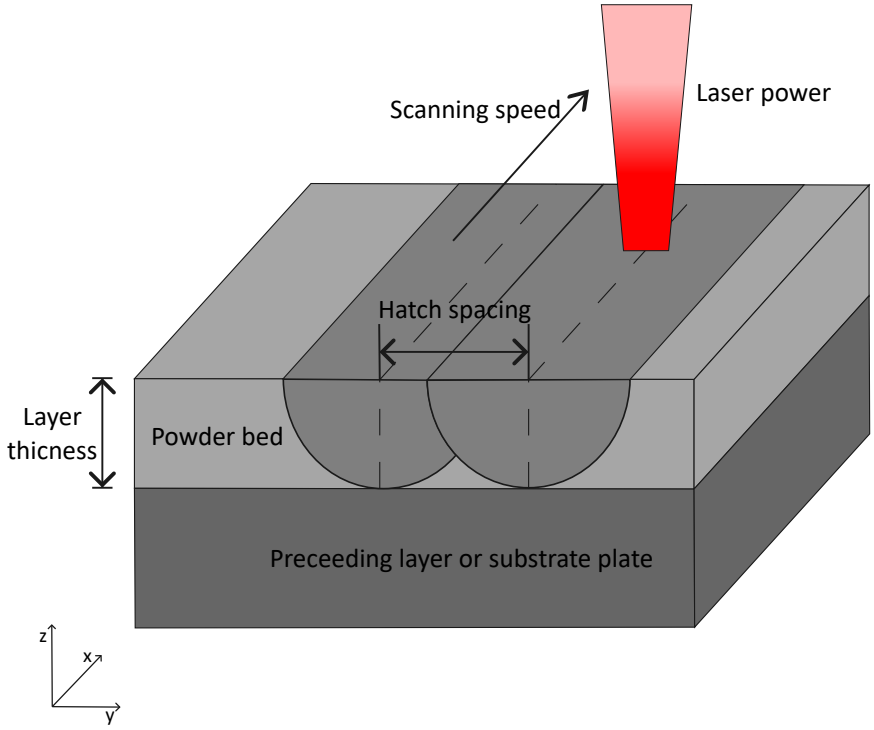


Figura 3: Esquema de los parámetros de PBF-LB/M (basado en [2])

Este calentamiento y enfriamiento rápido, causado por la fuente de calor móvil, resulta en la acumulación de tensión residual en la pieza que se está construyendo, lo que puede llevar a la formación de grietas si excede la resistencia de fluencia de la aleación que se está utilizando [1]. Para abordar esto, es crítico controlar parámetros como el espaciado de trama, potencia del láser, espesor de capa y velocidad de escaneo, ya que configuraciones inapropiadas pueden causar defectos como grietas. (Ver Figura 3) [2].

2.2. Método de elementos finitos

Esta sección tiene como objetivo proporcionar información esencial sobre el FEM para facilitar una comprensión integral de los temas discutidos a lo largo de este trabajo. La sección comienza con una definición del método y una breve descripción de su marco operativo, seguida de una visión general de la delineación de las Condición de bordes (BCs), una descripción de los elementos utilizados para discretizar el dominio, y una referencia a las herramientas implementadas.

2.2.1. Descripción

El FEM es una técnica numérica empleada para la discretización espacial de un medio continuo [13]. En esencia, implica particionar un medio continuo en un número finito de elementos discretos [13]. Esta metodología permite la solución de ecuaciones diferenciales parciales o inte-

grales, modelando así efectivamente el comportamiento de sistemas físicos [13]. Al discretizar el problema en elementos finitos, el número infinito de puntos de variables desconocidas se reduce a un conjunto finito manejable (estos puntos se denominan nodos) [14, 15].

Es crucial diferenciar entre métodos analíticos y numéricos dentro de este contexto. Los métodos numéricos producen soluciones aproximadas a los problemas, ya que las soluciones exactas típicamente son alcanzables solo a través de ecuaciones matemáticas que suelen ser demasiado complejas. [13, 15]

Desde una perspectiva física, este método puede interpretarse como una descomposición de un problema complejo en elementos más pequeños y manejables, donde el comportamiento de estos elementos se define por Grado de libertads (GdLs). Los GdLs representan los valores específicos de interés que uno busca derivar a través de la aplicación del método, como la temperatura de un cuerpo [14]. La aproximación de la variable bajo estudio se logra a través de la resolución de ecuaciones algebraicas que establecen las interrelaciones entre los comportamientos de los elementos [14].

La Figura 4 muestra un diagrama de la aplicación del FEM. Se inicia con la formulación de un modelo que representa la realidad, comprendiendo un conjunto de ecuaciones matemáticas que encapsulan los aspectos pertinentes de la aplicación en cuestión. El paso de discretización implica dividir el dominio en un número finito de elementos no superpuestos y también la discretización de ecuaciones en espacio y tiempo, si es necesario [16]. Una vez que la discretización está completa, el sistema de ecuaciones se resuelve, Ecuación (4), y se alcanza una solución discreta. En última instancia, la interpretación de estos resultados es de gran importancia para evaluar las etapas preliminares, llevando así a resultados más significativos. [14]

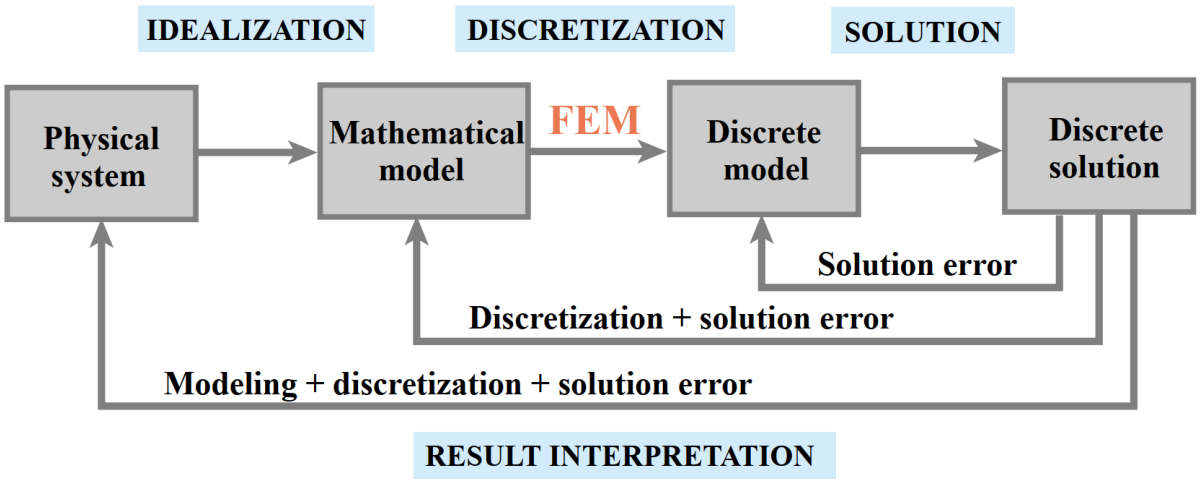


Figura 4: Estructura de la aplicación del Método de Elementos Finitos [14]

Matemáticamente, el FEM puede conceptualizarse como un enfoque sistemático para aproximar soluciones a Boundary Value Problem (BVP) particionando un dominio continuo en un número específico de subdominios, conocidos como elementos finitos [14, 16]. En el contexto del análisis de transferencia de calor, las ecuaciones gobernantes que definen el comportamiento de los elementos entran en juego. El fenómeno de conducción de calor se describe por

$$-\nabla(\mathbf{q}) + \rho c\dot{\phi} = \rho h \tag{1}$$

siendo

$$\nabla = \left\{ \begin{array}{c} \frac{\partial \cdot}{\partial x} \\ \frac{\partial \cdot}{\partial y} \\ \frac{\partial \cdot}{\partial z} \end{array} \right\} \tag{2}$$

donde ρ es la densidad, h es la generación de calor por unidad de masa, c es el calor específico, ϕ la temperatura, y $\mathbf{q}$ el flujo de calor. La Ecuación (1) también puede referirse como la *ecuación de balance*.[17, 15]

La q en la Ecuación (1) puede ser sustituida por

$$\mathbf{q} = -\boldsymbol{\kappa} \cdot \nabla \phi \tag{3}$$

donde κ es el coeficiente de conducción, una propiedad del material, y $\nabla\phi$ el gradiente espacial de temperatura. La Ecuación (3) también puede referirse como *ecuación constitutiva*. La *ecuación de balance*, Ecuación (1), describe la conducción de calor en un dominio dado, teniendo en consideración fuentes de calor. Por otro lado, la *ecuación constitutiva*, Ecuación (3), establece una relación entre el flujo de calor, $\mathbf{q}$, y el gradiente de temperatura, $\nabla\phi$, basada en propiedades del material.[15]

Cuando se trabaja con problemas lineales, para obtener una solución discreta al problema estudiado, este método resuelve

$$[\mathbf{K}]\{\phi\} = \{\mathbf{f}\} \tag{4}$$

$$\{\phi\} = [\mathbf{K}]^{-1}\{\mathbf{f}\} \tag{5}$$

donde

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11} & \mathbf{K}_{12} & \cdots & \mathbf{K}_{1m} \\ \mathbf{K}_{21} & \ddots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{K}_{m1} & \cdots & \cdots & \mathbf{K}_{mm} \end{bmatrix} \quad , \quad \{\mathbf{f}\} = \left\{ \begin{array}{c} \mathbf{f}_1 \\ \mathbf{f}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{f}_m \end{array} \right\} \quad \text{and} \quad \{\phi\} = \left\{ \begin{array}{c} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_m \end{array} \right\} \tag{6}$$

donde la matriz $\mathbf{K}$ se conoce comúnmente como la matriz del lado izquierdo, la cual encapsula los coeficientes asociados con las variables desconocidas en cada elemento y se obtiene como la suma de las matrices de rigidez de todos los elementos [18]. El vector $\mathbf{f}$ denota el vector de cargas, que representa la carga aplicada a cada elemento; esto corresponde al flujo de calor total [14]. El vector ϕ representa las variables desconocidas, es decir, los GdLs que deben determinarse [16, 15].

2.2.2. Condiciones de contorno

Como se establece en la Sección 2.2.1, este método da una solución aproximada a un BVP, por lo tanto es necesario definir apropiadamente las BCs [16, 19]. Según [14], hay dos categorías

de BCs: esenciales y naturales. Las BCs esenciales influyen directamente en los GdLs y se representan en el vector $\{\phi\}$, de la Ecuación (4), mientras que las BCs naturales no afectan directamente los GdLs y se definen en $\{\mathbf{f}\}$, de la Ecuación (4) [14].

En problemas de conducción de calor, dos tipos primarios de BCs se emplean típicamente: Neumann y Dirichlet [16]. Los cuales se definen por

$$\phi = \phi_0 \quad \text{en } \Gamma \tag{7}$$

$$q = -k\frac{\partial \phi}{\partial n} = C \quad \text{en } \Gamma \tag{8}$$

$$q = -k\frac{\partial \phi}{\partial n} = \alpha\left(\phi - \phi_0\right) \quad \text{en } \Gamma \tag{9}$$

donde Γ es la superficie de contorno de una geometría, ϕ es la temperatura, C es un flujo constante dado, α es el coeficiente de transferencia de calor, y ϕ_0 es una temperatura conocida [16, 19].

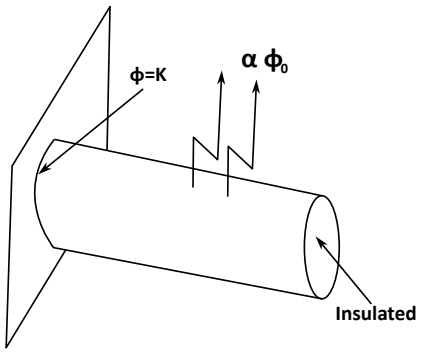


Figura 5: Esquema de aplicación de condiciones de contorno en un problema de transferencia de calor (basado en [16])

Las BCs de Dirichlet, Ecuación (7), especifican la temperatura en el contorno de la geometría y caen bajo la categoría esencial. Mientras que las BCs de Neumann, Ecuaciones (8) and (9) imponen un flujo de calor y se clasifican como BCs naturales [16]. La diferencia entre ambas definiciones de Neumann es que la Ecuación (8) impone un valor fijo para el flujo de calor, mientras que la Ecuación (9) representa la transferencia de calor debido a convección [16, 19].

Un ejemplo de la aplicación de estas BCs se muestra en la Figura 5. En este ejemplo, se impone flujo de calor en el lado izquierdo del cilindro, mientras que el extremo opuesto está aislado, significando $q = 0$. También, la transferencia de calor tiene lugar a lo largo del cilindro debido a convección.

La Figura 6 muestra un diagrama TONTI de las relaciones entre las Ecuaciones (1) and (3) y la aplicación de las BCs. De este diagrama se puede entender mejor cómo dichas ecuaciones vinculan q, $\nabla\phi$, y ϕ.

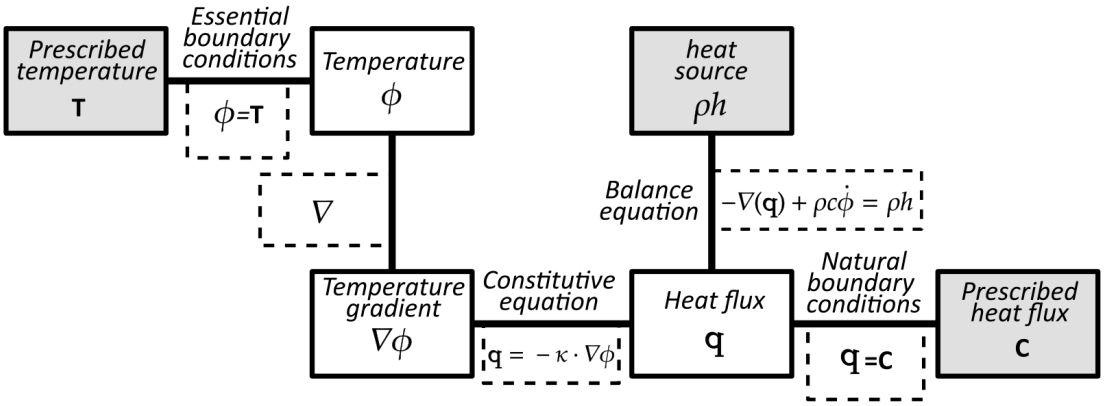


Figura 6: Diagrama TONTI del modelo de transferencia de calor (basado en [20])

2.2.3. Características de la malla

Como se mencionó en la Sección 2.2.1, un paso importante en FEM es la discretización del dominio en el cual se está llevando a cabo el estudio. La Figura 7 muestra un esquema de cómo un dominio se divide en partes más pequeñas llamadas elementos, que consisten en un número establecido de nodos. [16]

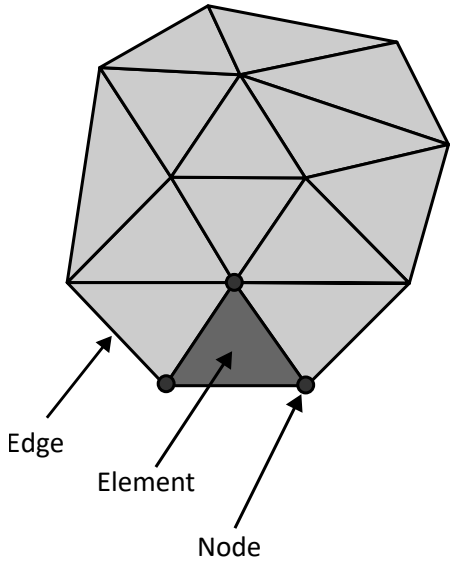


Figura 7: Discretización del dominio (basado en [16])

Hay dos tipos diferentes de mallas, la estructurada y la no estructurada. Ambas pueden verse en la Figura 8 lado a lado. Como la malla es estructurada, el orden y distribución de los nodos y elementos puede predecirse más fácilmente, permitiendo al programador trabajar con ellos más fácilmente.

Según [22, 15, 16], varios tipos de elementos pueden emplearse para la discretización espacial de la pieza bajo consideración. En este estudio, el enfoque está en elementos tetraédricos lineales y cuadráticos, que se utilizan en la herramienta de simulación AscentAM, descrita en la Sección 2.2.4. Estos elementos se ilustran en la Figura 9.

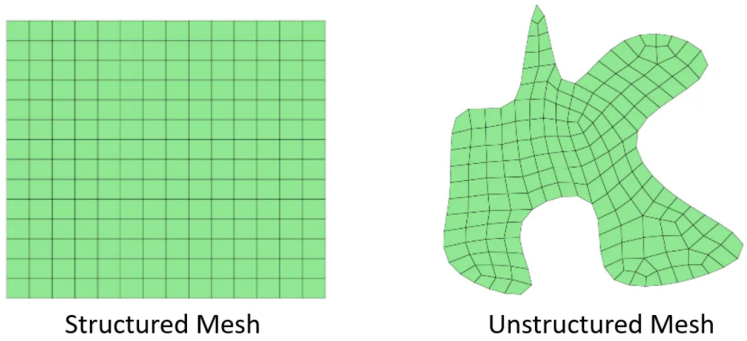
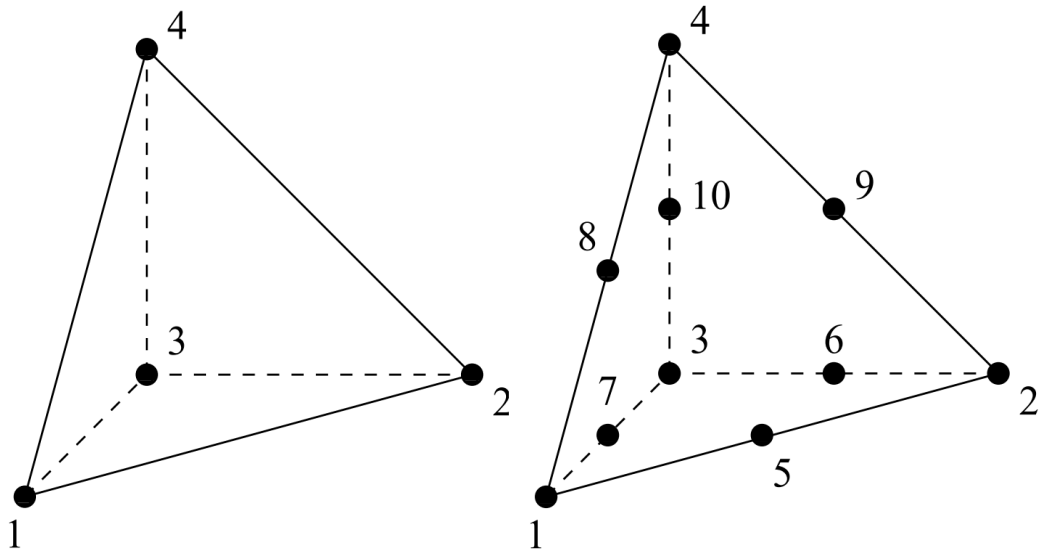


Figura 8: Comparación de una malla estructurada y una no estructurada [21]



(a) Elementos tetraédricos lineales (b) Elementos tetraédricos cuadráticos

Figura 9: Elementos tetraédricos [17]

La distinción principal entre los dos tipos de elementos tetraédricos radica en el número de nodos y puntos de integración [17]. Los elementos lineales consisten en 4 nodos y un solo punto de integración, mientras que los elementos cuadráticos contienen 10 nodos y 4 puntos de integración [17]. Según [22], la ventaja notable de estos elementos radica en su facilidad de automatización durante el proceso de mallado, junto con su flexibilidad inherente. No obstante, pueden no ser adecuados para escenarios que involucran deformaciones sustanciales e incrementan la carga computacional de la simulación [22, 15].

La Tabla 1 muestra los resultados obtenidos de una simulación en una viga empotrada para un caso en el cual la solución analítica es conocida. El punto interesante de los resultados es cómo evoluciona la solución y cómo difiere de la solución real a medida que aumenta el número de elementos, y por lo tanto el número de grados de libertad. Dependiendo de los criterios de evaluación del usuario, podría concluirse que refinar la malla después de 2300 elementos es inútil, ya que el error es menor al 1 %. [15]

Cuadro 1: Número de nodos y elementos y resultados de energía con error con elementos 2D de tres nodos (basado en [15])

Nodos	**Elementos**	**Energía**	**Error(%)**
91	144	0.0334113422626	12.687
325	576	0.0306058930879	3.225
1225	2304	0.0298900009824	0.811
4753	9216	0.0297098490031	0.203
18721	36864	0.0296647207994	0.051
74305	147456	0.0296534320547	0.013
Exacto	-	0.0296496684424	-

La calidad de los resultados obtenidos después de la implementación de este método numérico depende, entre otras cosas, de la malla utilizada para la simulación. Aunque es cierto que a medida que aumenta el número de elementos, el error estimado tiende a disminuir, [14] recomienda trabajar con la malla más gruesa que refleje el comportamiento físico bajo estudio. Es aconsejable limitar el refinamiento de los elementos a las zonas donde se espera un alto gradiente de la variable bajo estudio o zonas de interés en el dominio. El refinamiento de malla no puede usarse indiscriminadamente ya que el costo computacional aumenta exponencialmente en función de los GdLs a resolver. [15, 23]

Un enfoque efectivo para refinar la malla mientras se mantienen los costos computacionales manejables es definir regiones específicas para el refinamiento. Por ejemplo, la Figura 10 ilustra un método donde la malla solo se refina en la esquina inferior derecha. [23]

Cuando se utilizan resultados obtenidos previamente para identificar áreas que necesitan remallado, el proceso se refiere como refinamiento adaptativo de malla. Este enfoque típicamente se basa en el error de la solución calculada como su criterio. Basado en esta evaluación del error, uno de los métodos descritos a continuación se elige para refinar localmente la malla. Una manera común de definir el error es a través del error cuadrático medio, dado por

$$|\Delta\boldsymbol{\sigma}| = \left(\frac{\|\mathbf{e}_\sigma\|_{L_2}^2}{\Omega} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{10}$$

donde $\|\mathbf{e}_\sigma\|_{L_2}^2$ es la norma de energía de una solución, en este caso la solución sería σ, y Ω es el dominio. [15]

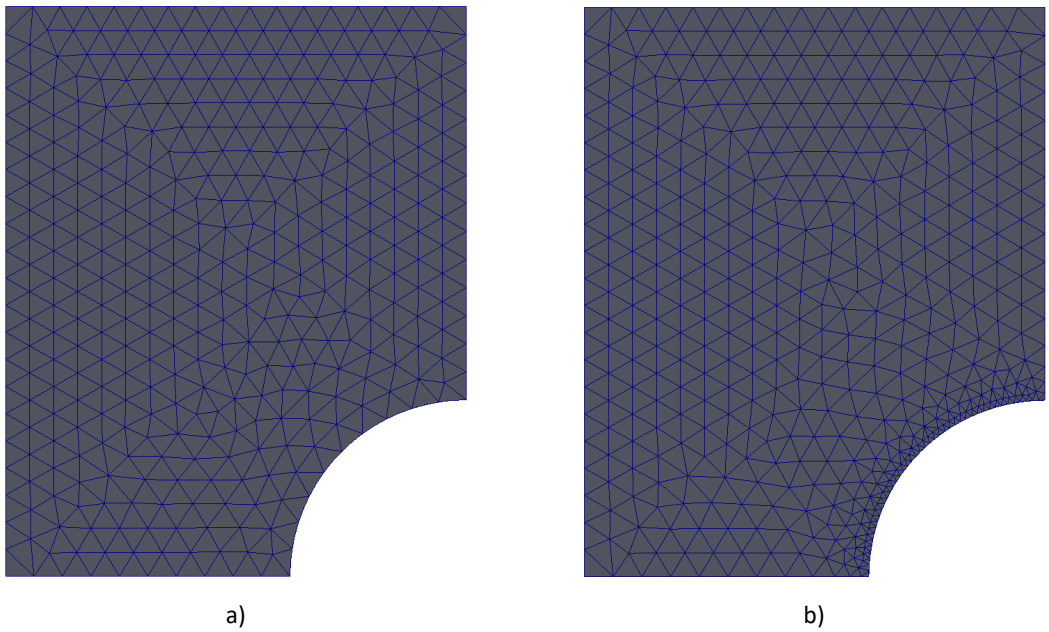


Figura 10: Refinamiento localizado de malla: a) malla sin refinamiento b) malla con refinamiento localizado de malla

Según [15], hay dos tipos diferentes de métodos de refinamiento de malla:

- refinamiento-h, en el cual el tipo de elemento permanece igual pero el tamaño y distribución cambia,
- refinamiento-p, el tamaño de los elementos permanece igual, pero se usan polinomios de orden superior para definir los elementos.

Hay varias maneras de implementar el refinamiento-h, y el método elegido depende de cómo se modifica el tamaño y forma de los elementos [15]. La Figura 11 presenta una representación esquemática de cómo se ve la malla refinada para cada uno de estos métodos. Según [15], el refinamiento-h puede ser:

- subdivisión de elementos, dividiendo los elementos que presentan un error mayor al deseado pero manteniendo el resto de los elementos intactos, ver Figura 11b,
- remallado, basado en los resultados de la simulación anterior, se redefine el tamaño de los elementos en toda la malla, ver Figura 11c,
- refinamiento-r, mantiene constante el número total de nodos en la malla pero ajusta la distribución de nodos, ver Figura 11d.

2.2.4. Herramientas de software empleadas

Esta sección introduce las herramientas utilizadas para completar las tareas descritas en esta tesis. Comienza con la herramienta *AscentAM*, una aplicación desarrollada en Python que genera archivos de entrada para *Calculix Crunchix*, un paquete de software que utiliza FEM.

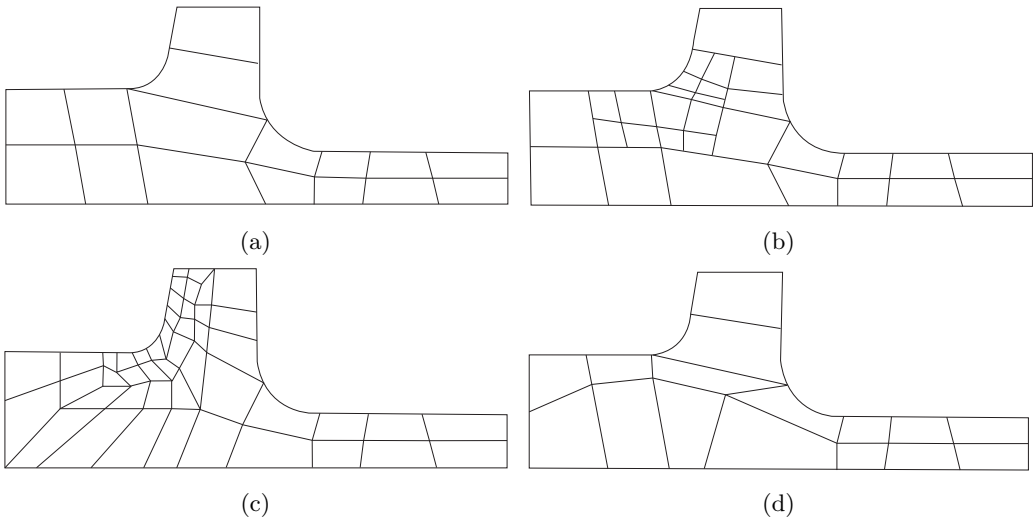


Figura 11: Esquema de las mallas resultantes antes y después de aplicar refinamiento-h: a) malla original b) después de aplicar subdivisión de elementos c) después de aplicar remallado d) después de aplicar refinamiento-r (basado en [15])

AscentAM

Ascentam es una herramienta de simulación diseñada para predecir las distorsiones y tensiones residuales en componentes fabricados a través de la tecnología PBF-LB/M. El objetivo principal de esta capacidad predictiva es facilitar la producción correcta desde el primer intento, permitiendo a los usuarios identificar y abordar áreas problemáticas potenciales en el diseño de impresión o proceso antes de que comience. [24]

El software modela efectivamente la cadena de proceso PBF-LB/M, incluyendo tratamiento térmico, a través de una simulación termo-mecánica secuencialmente acoplada que captura las interacciones significativas que impactan la fabricación. Las geometrías de piezas y estructuras de soporte se organizan en una plataforma virtual y se discretizan en una malla de elementos finitos durante el pre-procesamiento. El campo de temperatura se calcula y luego se toma en cuenta al calcular las distorsiones y tensiones residuales en la pieza.[24]

AscentAM utiliza *CalculiX CrunchiX*, descrito en la Sección 2.2.4, para soluciones numéricas y agrega subrutinas definidas por el usuario. Para mejorar la eficiencia computacional, emplea modelado a macroescala, agregando capas reales en compuestos de capas. Los procesos térmicos incluyen una fuente de calor de exposición flash y enfriamiento simulado a través de conducción y convección basada en gradientes de temperatura. [24]

En la fase estructural, la deformación y tensiones residuales se predicen usando un enfoque de análisis mecánico no lineal. Los nuevos compuestos de capas se activan a través de métodos de nacimiento y muerte de elementos para manejar las cargas efectivamente. El programa también tiene la posibilidad de simular el post- procesamiento de la pieza fabricada y luego tomar en cuenta los efectos en la pieza de separarlas de la plataforma de construcción y los tratamientos térmicos. [24]

Calculix

Calculix es un paquete de software de código abierto diseñado para la implementación del FEM para abordar varios problemas físicos. Opera principalmente en sistemas Linux y está desarrollado usando lenguajes de programación Fortran77 y C. Su naturaleza de código abierto

permite a los usuarios modificar rutinas existentes e incluso desarrollar rutinas personalizadas, lo cual es pertinente a este estudio. El software comprende dos componentes principales: *Calculix CrunchiX* y *Calculix GraphiX*. Para información detallada sobre estos componentes, los usuarios deben consultar la documentación relevante [17, 25].

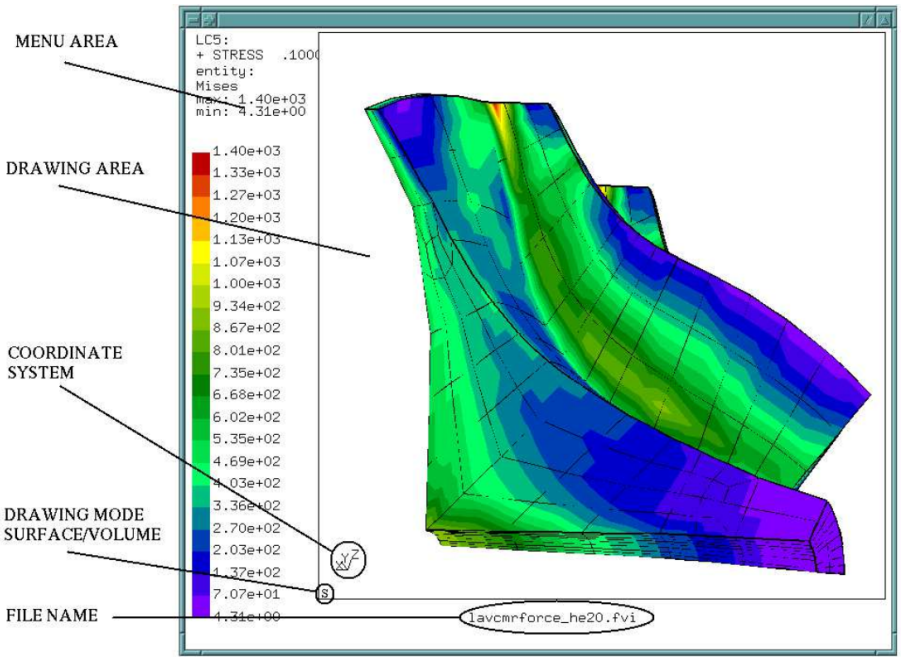


Figura 12: Interfaz gráfica de usuario de Calculix Graphix [25]

Calculix CrunchiX es el núcleo computacional donde ocurre el procesamiento. No hay interfaz gráfica de usuario, por lo que para iniciar una simulación, debe prepararse un archivo de entrada con la extensión *.inp*, describiendo los parámetros necesarios a través de tarjetas que invocan rutinas estándar o definidas por el usuario. Los resultados del análisis computacional pueden almacenarse en un archivo *.frd* o un archivo *.dat*. Los resultados en el *.frd* pueden exportarse en formato ascii o bin, el primero es útil para procesamiento numérico posterior, ya que le da al usuario un archivo con una salida estructurada desde donde los valores de resultado pueden leerse y trabajarse. Por otro lado, si el archivo *.frd* está en formato bin, es más liviano que el formato ascii y puede ser leído por la herramienta de post-procesamiento *Calculix GraphiX*.

Al completar la fase de procesamiento, los usuarios pueden realizar post-procesamiento en Calculix GraphiX usando como entrada el archivo *.frd* previamente mencionado. Esta herramienta facilita la visualización interactiva de resultados, permitiendo a los usuarios interactuar con los datos ya sea a través de una interfaz gráfica de usuario o a través de instrucciones de línea de comandos, ver Figura 12 para una representación de la interfaz gráfica de usuario del programa.

3. Estado del Arte

Este capítulo presenta una descripción integral de los últimos avances en ciencia y tecnología concernientes a la simulación del proceso de construcción para PBF-LB/M. La discusión comienza examinando los avances en simulación a escala microscópica, seguida por la escala mesoscópica, y finalmente, la escala macroscópica. Dentro de la discusión de escala macroscópica, se hace una diferenciación entre métodos que involucran refinamiento de malla y aquellos que no.

3.1. Descripción General

Existen tres categorías principales de modelado: analítico, numérico y empírico. Los modelos analíticos utilizan procesos matemáticos para describir las leyes físicas relacionadas con fenómenos específicos. Este enfoque es sólido pero tiene limitaciones, especialmente basadas en las suposiciones iniciales hechas en el estudio. Por otro lado, el método empírico examina resultados de varios experimentos para encontrar un modelo y coeficientes que mejor representen el comportamiento del fenómeno. Sin embargo, este método está limitado por las condiciones específicas de los experimentos realizados. El enfoque numérico involucra el uso de métodos numéricos para resolver ecuaciones físicas complejas de manera paso a paso. [26]

El radio del haz láser típicamente se encuentra en el rango de decenas de micrómetros [27], mientras que las piezas producidas mediante este proceso miden en las decenas de milímetros [11], lo que hace computacionalmente demandante simular. Múltiples métodos numéricos pueden aplicarse para resolver este problema; sin embargo, en este trabajo, el método utilizado es FEM (ver Sección 2.2). [1, 11]

[6] discutió tres métodos principales para modelar el proceso PBF-LB/M: microscópico, mesoscópico y macroscópico. Cada método tiene diferentes enfoques y usos. Comprender estos modelos es importante para mejorar el proceso PBF-LB/M, mejorar la calidad de la pieza final, y acercar al usuario a la manufactura correcta en el primer intento [6]. De acuerdo con [6]:

- los modelos microscópicos se enfocan en la pequeña escala del espesor de la capa de polvo y son típicamente bidimensionales. Ayudan a examinar factores importantes como la formación de microestructura,
- los modelos mesoscópicos observan la termodinámica del baño de fusión, ofreciendo perspectivas sobre la calidad de superficie, adhesión de capas, y defectos específicos, aunque usualmente evalúan solo una trayectoria de polvo,
- los modelos macroscópicos toman una vista más amplia analizando distribuciones de temperatura, tensiones residuales, y defectos a través de toda la pieza. Estos modelos tratan el polvo como un material uniforme y abordan los desafíos computacionales de las simulaciones más efectivamente.

Capturar con precisión los gradientes de temperatura transitorios resultantes del calentamiento localizado es crucial Sección 2.1.3, lo que requiere usar una malla con elementos finos para resolver efectivamente las ecuaciones de calor gobernantes alrededor de la fuente de calor. Sin embargo, extender esta malla fina para cubrir toda la pieza complica significativamente estas simulaciones. [11]

Aunque las escalas y aplicaciones de varios enfoques para la simulación del proceso de manufactura en PBF-LB/M difieren, es importante reconocer los beneficios potenciales de vincular estos métodos.Como señalan [6, 28, 29] los resultados obtenidos de un enfoque de simulación pueden servir como entrada para otro.Esta integración permite al usuario aprovechar las fortalezas clave de cada método, llevando a simulaciones de mayor calidad y mayor valor. [6, 28, 29]

Es importante distinguir cómo los esquemas numéricos abordan dos campos físicos diferentes. Hay dos enfoques: monolítico y particionado. El enfoque monolítico resuelve problemas multifísicos simultáneamente, mientras que el enfoque particionado aborda un campo a la vez. [6]

El esquema particionado puede implementarse de diferentes maneras [6]. Si los campos están fuertemente acoplados, el método resuelve iterativamente ambos campos dentro del mismo paso de tiempo [6]. Por el contrario, si el acoplamiento es débil, solo resuelve un campo por paso de tiempo [6].En un esquema secuencialmente acoplado, un campo físico se resuelve para todos los pasos de tiempo, y los resultados de ese campo se usan luego para calcular el otro campo [1, 24, 30].Al simular el proceso de construcción, los resultados de simulación térmica influencian los estructurales [1].

3.2. Simulación microscópica

Debido a los ciclos térmicos que experimentan los componentes producidos vía PBF-LB/M, estas piezas pueden exhibir una microestructura heterogénea y propiedades mecánicas anisotrópicas [29].Aunque estas características podrían inicialmente parecer perjudiciales, pueden ser ventajosas para aplicaciones específicas que requieren propiedades mecánicas alineadas predominantemente en una dirección o que necesitan un cierto grado de fragilidad en el componente manufacturado [29, 6].Consecuentemente, la capacidad de predecir la microestructura final de estas piezas mediante herramientas de simulación es de gran importancia [29, 6].

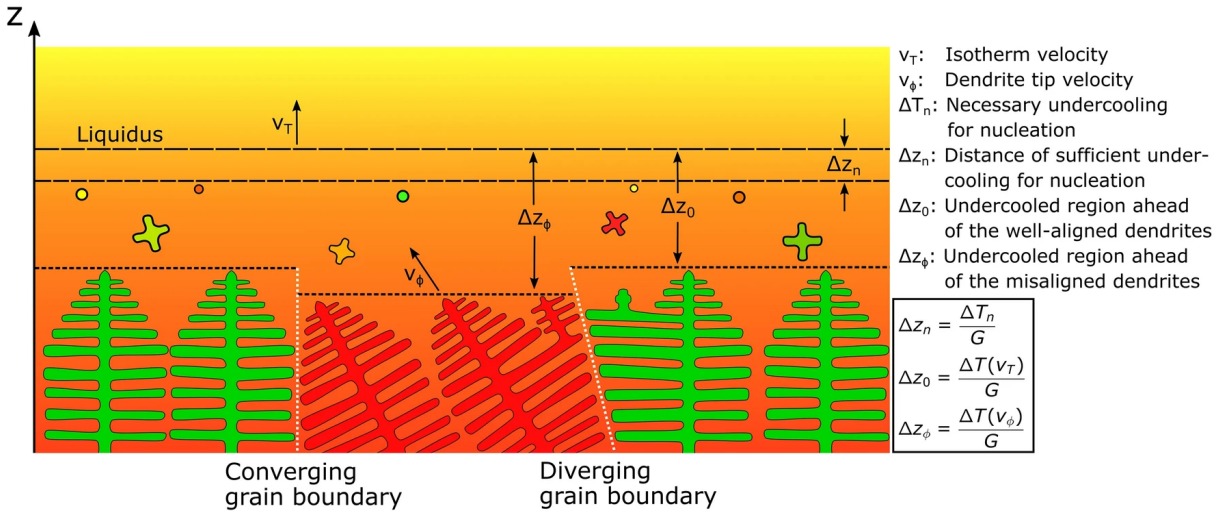


Figura 13: Esquema de solidificación del baño de fusión [28]

[28] identifica tres metodologías principales para pronosticar la microestructura de componentes fabricados usando PBF-LB/M: el método de campo de fase, autómata celular, y el método Monte Carlo Potts. Estos enfoques simulan la progresión del frente de solidificación que ocurre subsecuente a la formación del baño de fusión, cuando el material comienza a solidificar,

creando finalmente la capa actual. Una representación esquemática del proceso de solidificación dentro del baño de fusión sirve para ilustrar este fenómeno, particularmente destacando el crecimiento dendrítico a lo largo de la dirección z, ver Figura 13. Los dos atributos críticos de la solidificación son el gradiente térmico normal a la interfaz sólido-líquido y la tasa de solidificación, ambos de los cuales influencian significativamente la nucleación de nuevos granos y el proceso de crecimiento dendrítico[29].Una comparación esquemática de estas metodologías se presenta en Figura 14. [28]

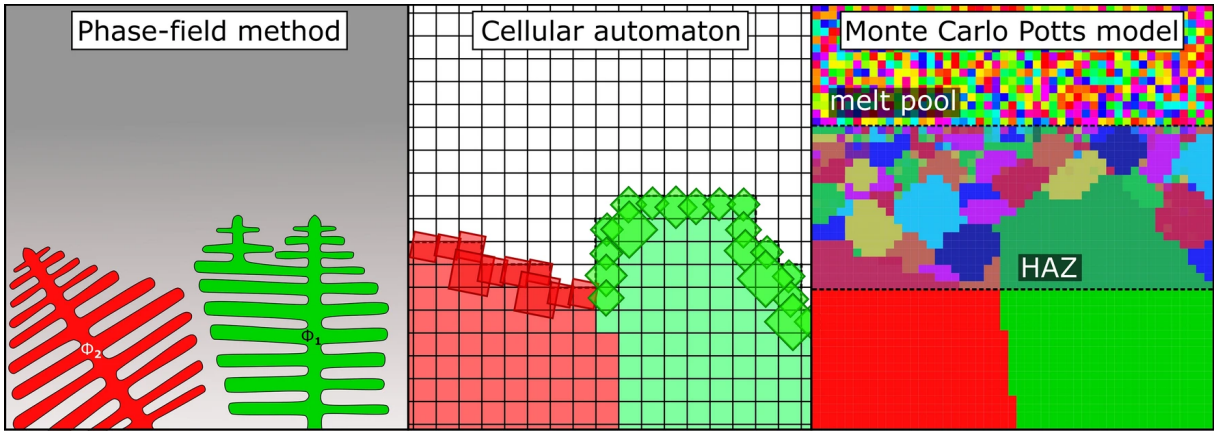


Figura 14: Comparación esquemática de resultados de métodos de simulación [28]

Los modelos de campo de fase describen efectivamente la dinámica de las transformaciones de fase y la evolución de microestructuras utilizando principios termodinámicos y cinéticos. Representan las interfaces de fase con una función de variación suave, con un campo escalar $\phi \in [-1; 1]$ donde $\phi = -1$ representa la fase líquida y $\phi = 1$ representa la fase sólida, todo dentro de una función, ver Ecuación (11), donde c es el campo de concentración, T la temperatura, V el volumen y f el potencial termodinámico [28]. Mientras que este método es elogiado por producir resultados de alta calidad que se asemejan estrechamente a la microestructura final, también es intensivo en recursos y es más adecuado para escalas menores. [29, 28]

$$F(\phi, c, T) = \int_V \left[f(\phi, c, T) + \frac{\int_\phi^2}{2} |\nabla \phi|^2 + g(\phi) \right] \mathrm{d}V \tag{11}$$

Por otro lado, el enfoque de autómata celular proporciona una representación simplificada de microestructuras y es particularmente beneficioso para dominios más grandes debido a sus menores demandas computacionales. En este método, el sistema físico se divide en celdas que interactúan con sus vecinos según reglas predefinidas para la simulación. [28]

Finalmente, el modelo Monte Carlo usa una estructura de reticulado donde cada sitio se asigna un estado específico. La formación de granos ocurre cuando los sitios vecinos comparten el mismo estado. Aunque este método puede aplicarse a dominios más grandes, tiene limitaciones para representar con precisión la formación microestructural de componentes creados mediante manufactura aditiva comparado con el método de campo de fase. [28]

3.3. Simulación mesoscópica

Las simulaciones mesoscópicas son esenciales para estudiar los fenómenos que ocurren en el baño de fusión. Como se mencionó en la introducción, ver Sección 3.1, estas simulaciones

típicamente se aplican en dominios de escala de línea láser única, permitiendo a los investigadores examinar el perfil de temperatura resultante del impacto láser y investigar ciertos defectos, como poros. [6]

[31] desarrolló un modelo mesoscópico que simula la transferencia de calor inducida por láser usando una herramienta llamada ALE3D. Esta herramienta incorpora una combinación de FEM y formulación de volumen finito. En su trabajo, se utilizó una malla compuesta de elementos de 3 micrómetros, lo cual es crucial para estudiar con precisión los fenómenos dentro del baño de fusión. Este modelo permitió a [31] analizar los efectos de la tensión superficial en el baño de colada durante PBF-LB/M. [31]

Por el contrario, [32] abordó el estudio del baño de fusión usando el método de elementos discretos junto con el método de diferencias finitas. El método de elementos discretos se aplica para generar aleatoriamente la distribución de polvo en la cama de impresión, mientras que el método de diferencias finitas calcula la transferencia de calor y el comportamiento del baño de fusión. [32] destacó la importancia de incorporar la evaporación en la simulación del proceso PBF-LB/M. Ignorar la evaporación lleva a un baño de fusión que es ancho y superficial; en contraste, considerar la evaporación resulta en un baño que es más profundo y estrecho, proporcionando así una representación más precisa de la realidad, ver Figura 15. [32]

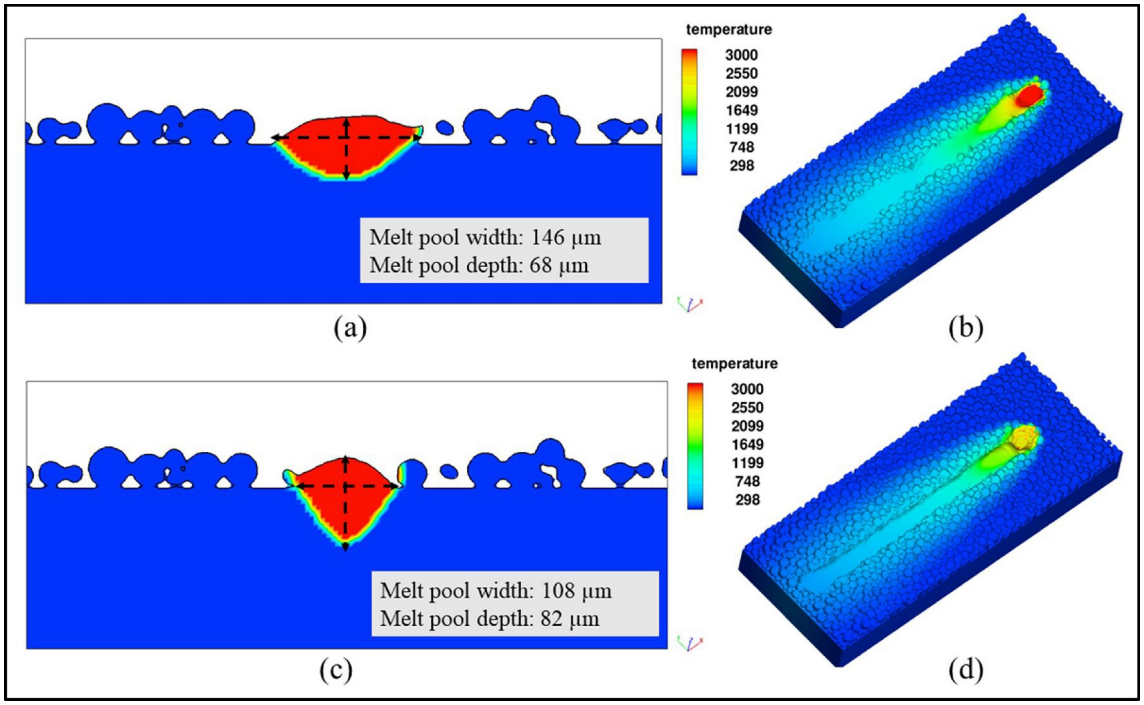


Figura 15: Simulación del baño de fusión: a & b desprecian la evaporación mientras c & d la toman en cuenta. [32]

Una desventaja significativa de este enfoque es su alto costo computacional, lo que limita su aplicación a dominios más pequeños [33]. Consecuentemente, el énfasis se ha desplazado hacia los aspectos térmicos de la simulación modelando las partículas de polvo como un continuo [34].

3.4. Simulación macroscópica

Esta sección examina estudios enfocados en simular el proceso de manufactura en PBF-LB/M a escala macroscópica, lo que se refiere a las dimensiones de la pieza siendo producida.

Estas simulaciones a menudo emplean varias simplificaciones para permitir una cobertura de área más amplia, proporcionando finalmente perspectivas sobre la distribución de temperatura y tensiones residuales dentro de la pieza. [6]

3.4.1. Sin refinamiento de malla

[35] propuso un método para optimizar el cálculo de entrada de calor combinando múltiples capas en un solo grupo en lugar de calcularlo capa por capa. Este enfoque permite la aplicación de entrada de calor para todo el grupo a la vez, lo que reduce significativamente el tiempo de simulación. En su artículo, recomiendan usar un espesor de capa fusionada de 1 mm o 50 µm. [35]

[36] presentó varios enfoques para modelar la interacción entre un haz láser y materiales, específicamente respecto a la simulación de entrada de calor. Entre estos métodos, el enfoque de exposición instantánea se destaca como el más eficiente [36]. Sin embargo, [37] argumentó que aunque este método es eficiente, carece de precisión. En contraste, las entradas de calor basadas en patrones, a pesar de requerir mayor esfuerzo computacional, producen resultados más precisos [11]. Esta precisión es crucial dado el impacto significativo de los gradientes de temperatura en la calidad de la pieza final [11].

[24] presentó una herramienta de simulación llamada *AscentAM* en su artículo. Esta herramienta emplea un método termo-mecánico de acoplamiento débil e incorpora la fusión de capas, que se mencionó anteriormente. Adicionalmente, *AscentAM* permite a los usuarios utilizar varios submódulos para simular todo el proceso de construcción de una pieza usando PBF-LB/M, incluyendo pasos críticos como tratamiento térmico. El objetivo principal de esta herramienta es predecir la tensión residual y distorsión final en la pieza, ayudando a lograr un proceso de producción correcto en el primer intento. Sin embargo, una limitación de la herramienta presentada es que usa exposición instantánea de calor para calentamiento, lo que permite simulaciones a escala de pieza pero restringe la precisión de los gradientes de temperatura transitorios obtenidos. [24]

[38] propuso un enfoque para mejorar la representación de la fuente de calor en la manufactura de piezas PBF-LB/M utilizando la herramienta de simulación *AscentAM*. [38] se concentró en fuentes de calor móviles que siguieron patrones específicos destinados a replicar el movimiento del haz láser sobre la superficie de impresión. En la aplicación de estas fuentes de calor, [38] desarrolló un algoritmo que dividió la capa de impresión en conjuntos de elementos y esos conjuntos en segmentos para la trayectoria del láser. Entre los modelos examinados, Fuente de calor Goldak (GWQ) demostró la mayor precisión en representar los efectos térmicos experimentados por piezas manufacturadas mediante este proceso. [38]

[11] propuso un enfoque de modelado térmico semi-analítico para el proceso de manufactura PBF-LB/M. Este artículo sugiere combinar técnicas analíticas para calcular una serie de fuentes de calor puntuales con herramientas numéricas para imponer condiciones de frontera. Dado que el gradiente térmico se analiza analíticamente, este método no requiere una malla fina en todo el dominio. Como resultado, tiene bajos costos computacionales y es adecuado para simulaciones a escala de pieza. [11]

3.4.2. Con refinamiento de malla

Para predecir con precisión el gradiente térmico transitorio de una pieza y simularla comprehensivamente, es esencial usar diferentes densidades de malla dentro del dominio. De lo contrario, la simulación podría volverse computacionalmente costosa. Un enfoque efectivo en el FEM es utilizar métodos Global-Local o Multi-Escala. Estos enfoques permiten predicciones precisas tanto de los fenómenos locales asociados con el haz láser como de los efectos globales de entrada de calor a escala de pieza.[39, 33]

El mallado dinámico, también conocido como remallado adaptativo, involucra utilizar una malla más densa alrededor del área donde el haz láser interactúa con el material. Este enfoque permite que se use una malla más fina en esa zona específica mientras se mantiene una malla más gruesa para el resto de la pieza. Como resultado, los costos computacionales permanecen menores comparado con usar una malla fina en todo el dominio [39].

[39] aplicó este enfoque en su artículo y comparó los resultados con una simulación que usa una densidad de malla mayor para la zona afectada por calor (el área rodeando el haz láser). Los autores utilizaron la funcionalidad de submodelado en ANSYS para crear una malla fina y localizada en la zona afectada por calor mientras mantenían una malla relativamente gruesa en las regiones circundantes, las diferentes mallas pueden verse en Figura 16. Empleando este método, observaron una reducción significativa en el esfuerzo computacional; la simulación con re-mallado dinámico requirió cinco veces menos tiempo que la que no lo tenía, y también resultó en un tamaño de archivo mucho menor para los datos de salida.

[33] presentó un método alternativo para reducir el esfuerzo computacional de simulaciones térmicas. Este enfoque también divide la simulación en dos escalas, como presentó [39]. Sin embargo, en este caso, las simulaciones se realizaron independientemente, similar a la estrategia de submodelado usada en FEM. El método se aplicó en una simulación térmica 2D usando Abaqus, y los resultados demuestran una reducción del 80 % en tiempo de cómputo mientras se logra un error menor al 1 % comparado con una malla más fina. Gracias a este método propuesto, las simulaciones locales para cada capa pueden realizarse simultáneamente, disminuyendo significativamente los requerimientos computacionales.

Aunque no se utilizó para simulación térmica, [40] aplicó el método de submodelado dentro del FEM para mejorar la predicción de agrietamiento durante el proceso PBF-LB/M antes de que la pieza real fuera impresa. Inicialmente, se realizaron simulaciones preliminares para reunir resultados iniciales, después de lo cual el enfoque se desplazó a la Región de interés (ROI), representada en Figura 17. Una vez que los desplazamientos de los nodos a lo largo de la frontera del submodelo fueron calculados en la primera simulación, estos resultados se usaron para establecer las condiciones de frontera para la malla más fina del submodelo aproximando los valores para los nuevos nodos. La escala menor del submodelo comparada con el modelo principal permite obtener resultados más detallados sin incrementar significativamente el costo computacional de la simulación. De hecho, este enfoque puede incluso llevar a simulaciones más rápidas cuando se analizan modelos complejos.

Un punto importante destacado por los autores es el posicionamiento del modelo local dentro del sistema de coordenadas global. Debe colocarse precisamente en la ubicación que corresponde a la región relevante del modelo global. Los autores indicaron que este enfoque ha demostrado ser efectivo para tales problemas, reduciendo significativamente el tiempo requerido comparado con realizar una simulación más detallada del modelo global.

[41] aplicó el método de submodelado para investigar agrietamiento en el soporte sólido-

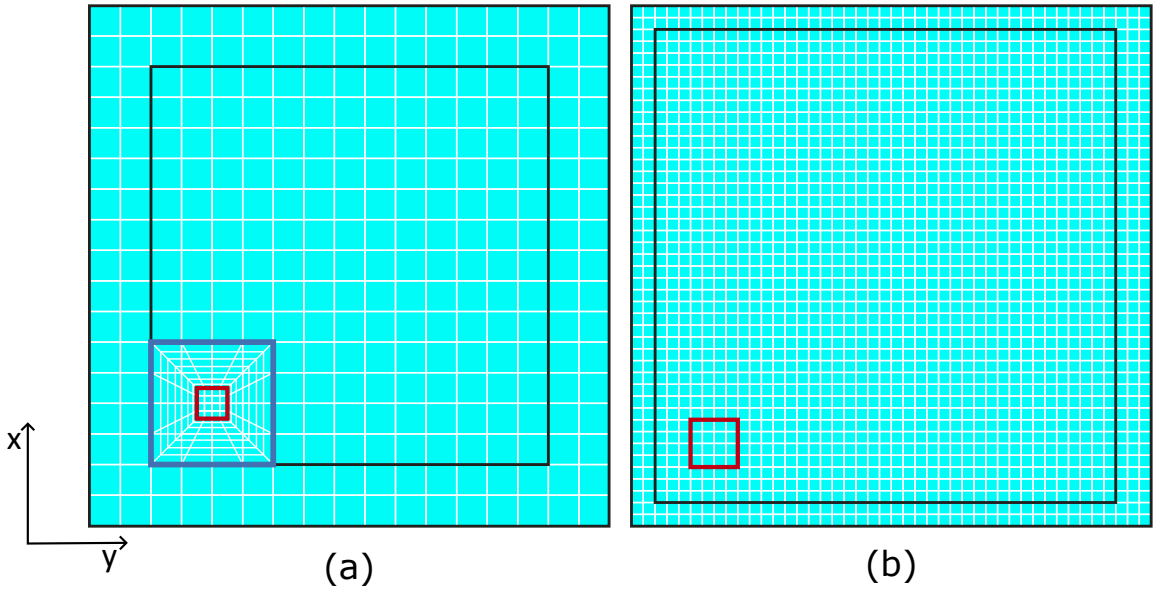


Figura 16: Mallas de elementos finitos; a) malla con mallado dinámico b) vista superior de malla con mallado dinámico c) vista superior de malla estática con la densidad de la zona local (basado en [39])

diente en PBF-LB/M. Los autores utilizaron un enfoque multi-escala para predecir mejor el desarrollo de grietas en la interfaz entre soportes de diente y estructuras sólidas. Primero, se usó un modelo global para analizar la tensión residual en todo el modelo. Luego, se empleó un modelo local para realizar simulaciones más detalladas, mejorando la precisión. Las condiciones de frontera para el submodelo se derivaron del modelo global. Este artículo demostró que el enfoque multi-escala es efectivo para lograr resultados más detallados en regiones específicas de un modelo mientras mantiene los costos computacionales manejables. Usando este método, los costos computacionales se redujeron significativamente. Sin el enfoque de modelado global-local, los cálculos tomarían 10 días. Sin embargo, cuando se aplica este enfoque, la simulación solo toma 8 horas, resultando en una diferencia del 4.36 % en los resultados.

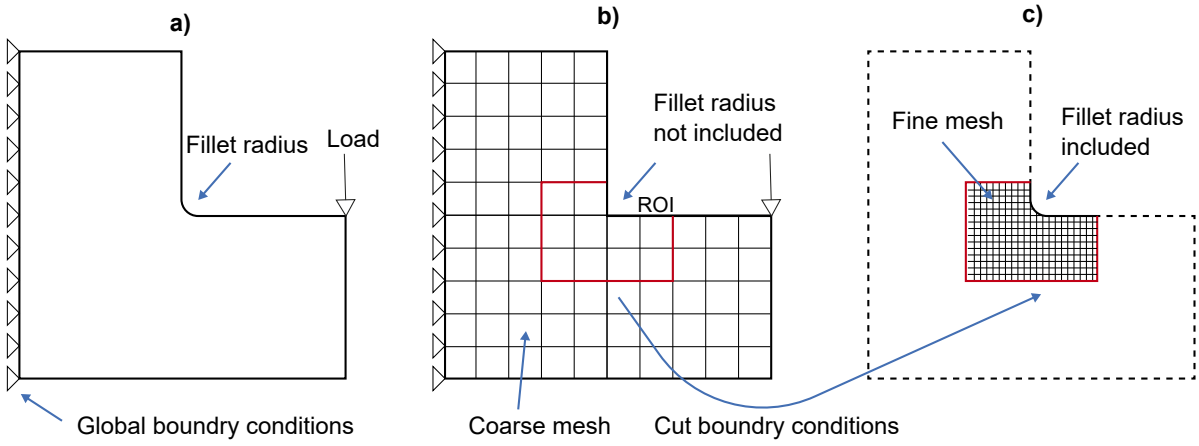


Figura 17: Representación del enfoque de submodelo. a) Muestra el sistema real a ser simulado. b) Muestra el modelo global a ser simulado y la ubicación de la región de interés. c) Muestra la región de interés remallada con una malla más fina (basado en [40])

3.5. Valor agregado pretendido

Este capítulo examinó el panorama actual de ciencia y tecnología relevante al tema. La literatura indica una relación bien establecida entre los gradientes térmicos creados por el calentamiento y enfriamiento repetido en puntos específicos de una pieza durante el proceso de manufactura PBF-LB/M. Este ciclado térmico puede llevar a varios defectos, como grietas y distorsiones [1, 2, 6].

Aunque las simulaciones pueden ofrecer perspectivas detalladas sobre el gradiente térmico transitorio rodeando el área afectada por el haz láser, usualmente están restringidas a dominios pequeños. Esta limitación ocurre debido a los altos costos computacionales asociados con la malla densa requerida para modelar con precisión los fenómenos involucrados. Este límite puede verse en los trabajos presentados por [28, 31, 32], donde la escala requerida para las simulaciones hace que el enfoque no sea aplicable a simulaciones a escala de pieza.

Múltiples métodos han sido propuestos para disminuir el tiempo computacional de simulaciones mientras se mantiene la precisión. Como propuso [35], agrupar múltiples capas en los cálculos. Diferentes maneras de modelar la entrada de calor fueron propuestas, obteniendo resultados satisfactorios mientras se mantienen los costos computacionales manejables [36]. Sin embargo, estos resultados carecían de precisión [37].

Otro enfoque es trabajar con métodos de refinamiento de malla. Con refinamiento adaptativo de malla, la malla podría alcanzar un tamaño menor solo cuando se necesita, reduciendo la carga computacional [39, 33]. El submodelado es otra alternativa, como propusieron [40, 41]. Sin embargo, hasta el mejor conocimiento del autor, no ha habido investigación que aplique el método global-local de submodelado a una simulación térmica 3D para PBF-LB/M.

El objetivo de este trabajo es simular los efectos del ciclado térmico en una pieza manufacturada usando PBF-LB/M mediante la aplicación de una fuente de calor móvil. Este estudio busca representar estos efectos con mayor precisión mientras mantiene un costo computacional manejable.

Este trabajo introduce un enfoque novedoso destinado a abordar efectivamente estos objetivos. Los detalles de esta estrategia se delinean como sigue:

- para reducir la carga computacional, el enfoque de submodelado será utilizado para la simulación térmica.,
- nuevas BCs serán empleadas, en lugar de usar la temperatura como BCs, se usará el flujo de calor,
- para automatizar más el proceso, la región que debería ser estudiada más será extraída automáticamente del dominio,
- la malla para la ROI será mallada automáticamente.

4. Enfoque Metodológico

Este capítulo describe la metodología empleada para abordar las tareas en cuestión. Está organizado en tres secciones principales. La Sección 4.1 proporciona una visión general de las tareas a abordar y explica el enfoque adoptado para resolverlas. La Sección 4.2 detalla los procesos involucrados en la extracción y generación de una nueva malla para la ROI, y la Sección 4.3 discute cómo se resuelve el problema de las BCs.

4.1. Descripción General

En esta sección se proporciona una descripción general del enfoque de submodelado. Primero, en la Sección 4.1.1 se describe el estado actual del proceso y se brinda una breve introducción al proceso. Luego, en la Sección 4.1.2, se describe el proceso para este enfoque con mayor detalle.

4.1.1. Enfoque de submodelado

Como se introdujo en la Sección 2.2.4, las herramientas utilizadas para esta investigación fueron *AscentAM* y *Calculix*. *AscentAM* permitió el uso de diferentes aplicaciones para simular una variedad de casos. Para esta tesis, se emplearon dos aplicaciones específicas:

- Full Thermal Full Mechanical (FTFM) es una aplicación que realiza dos simulaciones; primero, una simulación térmica, y luego una simulación mecánica utilizando los resultados de la simulación térmica.
- Fuente de calor movil (MH) es una aplicación desarrollada por [42], que aplicó una fuente de calor móvil en simulaciones locales. Las implementaciones creadas en el transcurso de este trabajo se aplicaron a esta aplicación.

La aplicación MH utiliza una metodología de submodelado para aplicar una fuente de calor móvil a través del dominio. Como se explicó en la Sección 3.4.2, este enfoque involucra identificar las áreas de mayor interés para el estudio y extraerlas del dominio general, las ROIs. Esto permite que se realicen simulaciones computacionalmente intensivas dentro del dominio localizado, manteniendo así un esfuerzo computacional manejable.

La Figura 18 ilustra el proceso para aplicar este método con la intención de usar los resultados del submodelo para simular el comportamiento de la microestructura. El primer paso involucra extraer las ROIs del modelo global. Una vez que se define el dominio local, las BCs se definen extrayendo los resultados de la simulación global e interpolándolos en el dominio local. Por último, se ejecuta la simulación local.

4.1.2. Proceso de simulación

Para aplicar esta metodología, primero se deben realizar dos simulaciones. El paso inicial involucra realizar una simulación térmica de todo el dominio para obtener la distribución de temperatura en la pieza durante el proceso de fabricación. Una vez que se completa esta simulación térmica, los resultados se utilizan para realizar una simulación estructural del mismo dominio. Esta simulación estructural revela la acumulación de daño en la pieza, lo que sirve como indicador para identificar ROIs donde hay una alta probabilidad de fracturas.

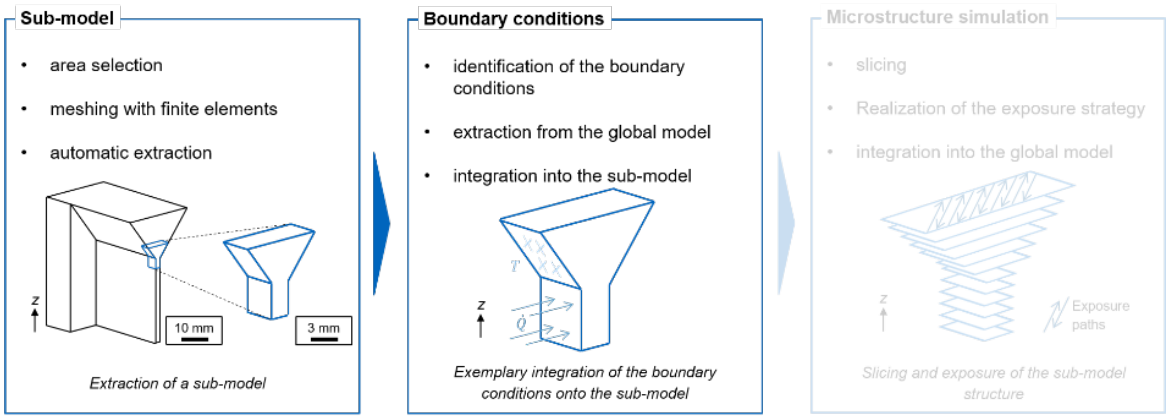


Figura 18: Esquema de las etapas del proceso para aplicar el enfoque de submodelado para la simulación de microestructura

Después de obtener los resultados de la simulación estructural, se lanza la aplicación MH de *AscentAM*. Esta aplicación permite a los usuarios identificar automáticamente las ROIs. Una vez que se detectan estas ROIs, el usuario puede seleccionar cuáles desea examinar en detalle y usar para simulaciones con la aplicación MH. El proceso de extraer estas ROIs y crear la malla se explica en mayor detalle en la Sección 4.2.

En la aplicación MH, varios procesos tienen lugar para simular cada ROI. Primero, la aplicación procesa la información de la malla y genera los conjuntos de elementos necesarios para la simulación. Durante este proceso, el programa lee la malla y crea conjuntos de elementos, incluyendo conjuntos para capas de impresión, las líneas dentro de esas capas, segmentos, y más. Antes de las implementaciones realizadas en este trabajo, era esencial haber generado ya el archivo que contiene la malla de la ROI a estudiar.

Después de generar el archivo que contiene el conjunto de elementos y nodos, la aplicación pasa a crear el archivo de entrada para *Calculix*. Este proceso también considera varios parámetros especificados por el usuario en el archivo de configuración. Todos los parámetros necesarios para simular las ROIs se especifican en el archivo de entrada generado. Hay varias secciones importantes que vale la pena mencionar. Al comienzo del archivo de entrada, se define el nombre del archivo de resultados (*.frd*), que almacena los resultados de la simulación global. Este paso es crucial porque, para implementar el método de submodelo, se necesitan los resultados del modelo global como BCs para el modelo local. En los pasos subsiguientes, la temperatura obtenida de los resultados globales se aplica como una BC usando la palabra clave BOUNDARY, SUBMODEL.

La fuente de calor está representada por GWQ, como se detalla en [38]. La Figura 19 ilustra un esquema de la geometría utilizada para distribuir el calor agregado a través del dominio. Para este modelo, es esencial definir los valores de a, b, y c, que dictan la geometría. Además, es crucial especificar con precisión los parámetros del haz láser modelado, incluyendo su potencia y eficiencia [38]. Durante el desarrollo de este proyecto, se realizaron modificaciones a la fuente de calor previamente implementada. Se detectaron problemas en cómo se modelaba la geometría en la que se agregaba calor al modelo, por lo que se modificó para que el calor se distribuya completamente en la región definida.

Para modelar instancias donde el haz láser sale de la ROI, se implementa un proceso llamado "pasos de enfriamiento". Durante estos pasos, solo se calcula la propagación de calor dentro

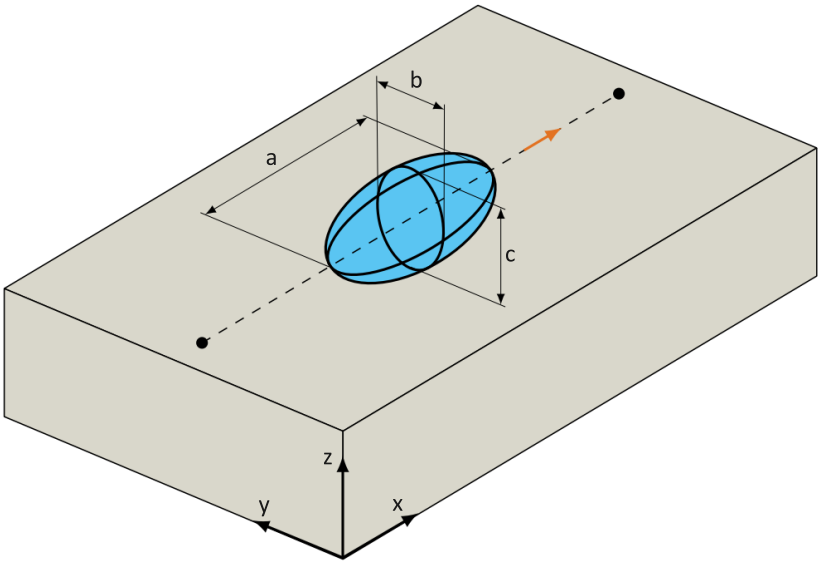


Figura 19: Esquema de la geometría de la fuente de calor Goldak (basado en [38])

del dominio, sin ninguna fuente de calor presente. Este proceso continúa hasta que el haz láser comienza a trazar la siguiente línea.

Antes de las implementaciones de este trabajo, el archivo de resultados incluía solo las temperaturas resultantes. Estas simulaciones se realizan para llevar a cabo, en una etapa posterior, simulaciones de la microestructura en las ROIs. La Figura 20 ilustra un esquema diseñado para aclarar el flujo de información entre las diferentes partes del proceso de simulación descrito en esta sección. Con la malla del dominio global y el archivo de configuración, tanto las simulaciones térmicas como estructurales pueden ejecutarse con su respectivo archivo de entrada, utilizando los resultados de la simulación térmica para configurar la estructural. Una vez que se ejecutan estas simulaciones, los resultados de las simulaciones estructurales se utilizan para definir las ROIs y los resultados de la térmica para las BCs para ejecutar la simulación local.

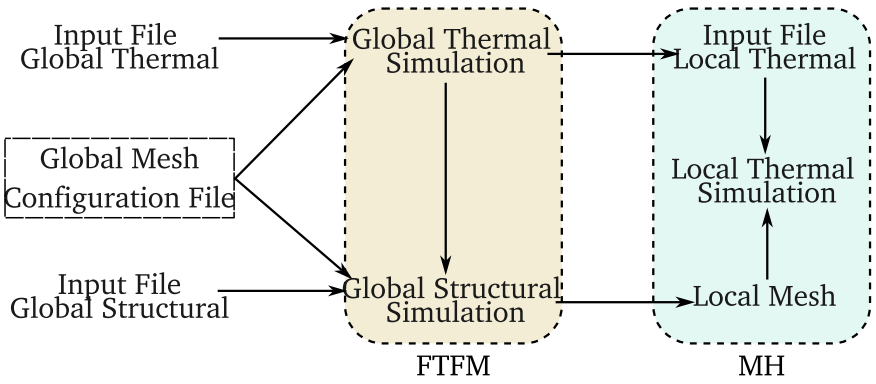


Figura 20: Esquema del flujo de información en el proceso de simulación

4.2. Extracción y Generación de Malla

A lo largo de esta sección, se explica en detalle el proceso de extraer las ROIs y mallarlas en la aplicación MH. La Sección 4.2.1 detalla el proceso de extraer las ROIs. La Sección 4.2.2 describe el proceso de generación de malla.

4.2.1. Extracción de Región

Para extraer las ROIs del modelo global, es vital primero identificarlas. Como se mencionó en la sección anterior, la identificación de las ROIs se basa en el valor del indicador de daño de la simulación estructural global.

Para identificar las ROIs, primero se debe definir un parámetro por el cual la región se considere de interés o no. El parámetro Param_DI_SM es definido por el usuario en el archivo de configuración requerido para iniciar la simulación. El valor típicamente considerado para que el valor de fractura sea de interés es 1.

Ya en la aplicación, se le ofrece al usuario la opción de detectar automáticamente las ROIs. Si el usuario elige hacerlo, la aplicación reconoce los valores máximos del indicador de daño almacenados en el archivo de resultados estructurales de la simulación global. Esto se hace para comparar los valores máximos registrados en los nodos con el límite impuesto en el archivo de configuración.

Una vez que se han detectado todos los nodos que alcanzan o superan el valor impuesto, el usuario debe elegir un valor para el margen de la región de cada nodo. Esto hace que cada nodo donde se supera el valor definido genere una región cúbica a su alrededor basada en este parámetro. Por defecto, el margen de la región es 1 mm.

Una vez que se genera cada región alrededor del nodo, estas áreas se comparan entre sí. Como las regiones alrededor de los nodos se superponen, se fusionan en una sola ROI. La Figura 21 muestra un esquema que describe este proceso. Los puntos rojos son nodos que cumplen la condición necesaria para generar ROIs. Estos nodos tienen una región cúbica a su alrededor, que genera el margen estipulado por el usuario. La región que abarca las dos regiones de elementos resulta de extraer las coordenadas más altas de las esquinas, para definir una de ellas, y las más bajas para definir la otra.

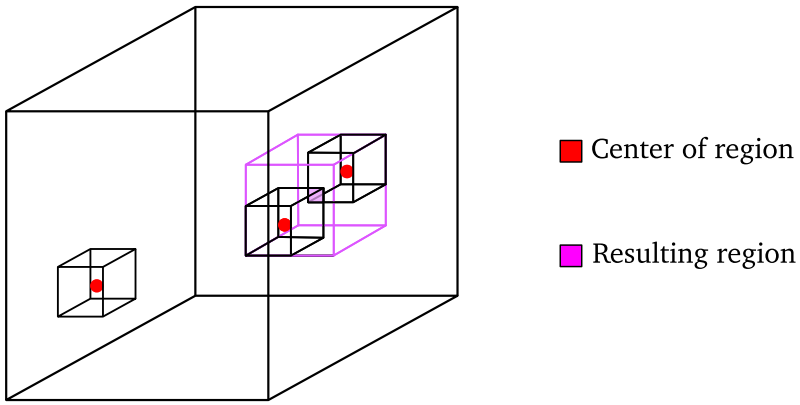


Figura 21: Nodos donde se superó el umbral de daño por fractura y regiones generadas

Como resultado de este proceso, el usuario recibe una lista de las regiones resultantes del

dominio bajo estudio. Las regiones se definen por tres propiedades, el índice y dos esquinas opuestas que describen un paralelepípedo rectangular.

4.2.2. Generación de Malla

El usuario puede elegir una de cuatro opciones de mallado. Esto se propone para hacer que la herramienta sea adaptable a tantos usos como sea posible, permitiendo al usuario ajustar la herramienta a sus necesidades.

Las cuatro posibilidades entre las que el usuario puede elegir son:

- no mallar ninguna región,
- mallado de todas las regiones listadas,
- realizar el mallado de una sola región de la lista,
- realizar el mallado de una región definida por el usuario.

La primera opción surge porque el usuario puede haber generado ya la malla de la región a estudiar anteriormente. Esto hace innecesario ejecutar esta implementación de la herramienta. También es posible que el usuario quiera comparar los resultados de dos simulaciones modificando solo los parámetros de la simulación y no los de la malla. Esto permite al usuario comparar ambos resultados asegurándose de que ambas mallas sean idénticas. Esta opción es la opción por defecto utilizada por el programa.

Las dos opciones siguientes requieren que el usuario primero ejecute la opción para detectar automáticamente las ROIs en el dominio. La primera opción significa que cada vez que se generan los archivos para la simulación de una ROI, también se genera la malla para esa región. Por otro lado, la tercera opción permite al usuario elegir una de las ROIs detectadas, y se genera la malla para ella.

Finalmente, la cuarta opción permite al usuario definir por sus propios medios la región a ser mallada. Cuando se selecciona esta opción, el programa le pide al usuario que defina las coordenadas de los dos nodos en esquinas opuestas, uno en la base del paralelepípedo y uno en la parte superior del paralelepípedo. Es responsabilidad del usuario definir este dominio y asegurarse de que pertenezca al dominio de la simulación global.

Una vez que se selecciona el caso de mallado, el usuario tiene la opción de elegir el tamaño máximo del elemento. Cómo este parámetro impacta la construcción de la malla se detalla más adelante en esta sección. El autor define el tamaño máximo del elemento como la arista más larga del elemento, y el valor por defecto es 0,08 mm.

Había dos formas posibles de generar la malla. Una era implementar una biblioteca de Python que genere los nodos y elementos de malla para el dominio especificado por sí misma. La otra era generar las divisiones del dominio y definir los elementos manualmente. Se eligió la última ya que el autor la considera de mayor valor para el trabajo futuro, ya que da a los futuros investigadores la posibilidad de modificar el proceso de mallado. Si se hubiera elegido la primera, la herramienta estaría limitada a las opciones ofrecidas por la biblioteca en cuestión.

El tipo de malla a generar es estructurada, como se muestra en la Figura 8. Esto se debe a lo mucho más simple que es generar tal malla, comparado con una no estructurada. Para iniciar

el proceso de generación de malla, las coordenadas de las esquinas de la ROI a ser mallada se utilizan como entrada. Con esta información, se define entonces el dominio con el que trabajar. La malla a generar está compuesta de elementos tetraédricos, definidos en la Sección 2.2.3.

Para iniciar la generación de malla, el primer paso es dividir la región en una grilla. Esto proporciona las coordenadas que luego se utilizan para definir los nodos que forman los elementos.

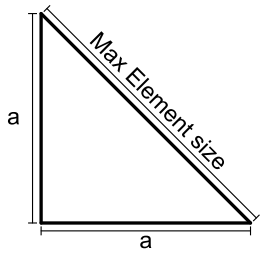


Figura 22: Cara del elemento tetraédrico con tamaño máximo de elemento

Para dividir el dominio, se utiliza el tamaño máximo del elemento, previamente definido por el usuario. Como la malla es estructurada y conociendo cómo se forman los elementos de malla (explicado más adelante), se puede definir apropiadamente la arista más grande de los elementos. La Figura 22 muestra la cara de los tetraedros que formarán la malla. Conociendo la dimensión de la arista más grande y asumiendo que las otras dos aristas son iguales entre sí, se puede calcular a. El valor de a está definido por

$$a = \frac{\text{Tamaño máximo de elemento}}{\sqrt{2}} \tag{12}$$

Teniendo el resultado de a, este valor se utiliza para dividir la región a mallar. La Figura 23 muestra una ilustración de la división de la ROI en intervalos del tamaño del valor de a. Dividiendo este espacio en intervalos de x, y, y z; estos valores pueden utilizarse para formar las coordenadas de los nodos.

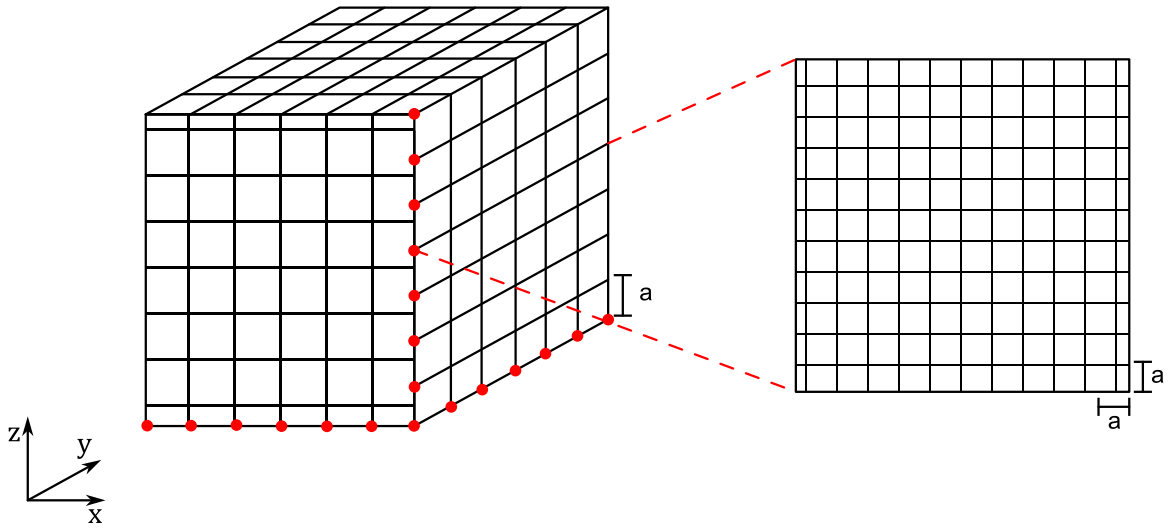


Figura 23: Región con grilla de nodos generada

Con los nodos ya definidos, puede comenzar el proceso de generar los elementos tetraédricos. Este proceso aprovecha el hecho de que las ROIs son paralelepípedos rectangulares, lo que significa que su dominio puede dividirse fácilmente en hexaedros. El proceso de generar los elementos tetraédricos consiste en tres partes:

- se generan los elementos hexaédricos que ocupan todo el dominio a mallar,
- se asigna un valor correspondiente al hexaedro a ser descompuesto,
- el hexaedro se descompone en cinco tetraedros.

La primera parte consiste en dividir el dominio de malla en hexaedros. Esto se hace utilizando la grilla de nodos generada anteriormente y asignando un nodo a cada esquina del volumen. Es importante tener en cuenta qué nodo se asigna a cada esquina del elemento ya que, como se discute más adelante, es muy importante para su descomposición. La Figura 24 muestra la numeración de las esquinas del hexaedro. Esta numeración se respeta al determinar qué nodos conforman los tetraedros resultantes de la descomposición de los hexaedros.

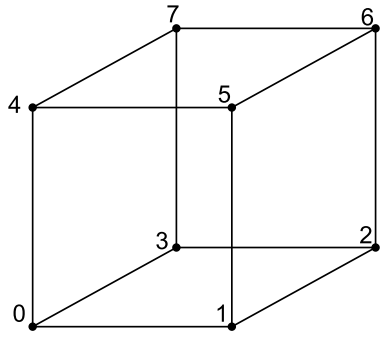


Figura 24: Numeración de nodos del elemento hexaédrico

Antes de explicar por qué a cada hexaedro se le asigna una descomposición diferente, es importante explicar en qué consiste la descomposición de un hexaedro. El hexaedro puede descomponerse en un número de tetraedros. El número de tetraedros en los que se descompone el hexaedro limita la forma que pueden tener los tetraedros resultantes, es decir, qué nodos conforman la figura. La Figura 9 ilustra cómo se ve la forma final de un elemento tetraédrico.

Para este trabajo, se intentó mantener similar el volumen de los elementos tetraédricos entre los elementos resultantes de la descomposición. Esto es para mantener baja la relación entre las aristas de los elementos. La descomposición de los elementos hexaédricos implementada en este trabajo es, en general, como se muestra en la Figura 25.

Esta descomposición produce 5 tetraedros por cada hexaedro descompuesto. Los tetraedros resultantes están compuestos por los nodos

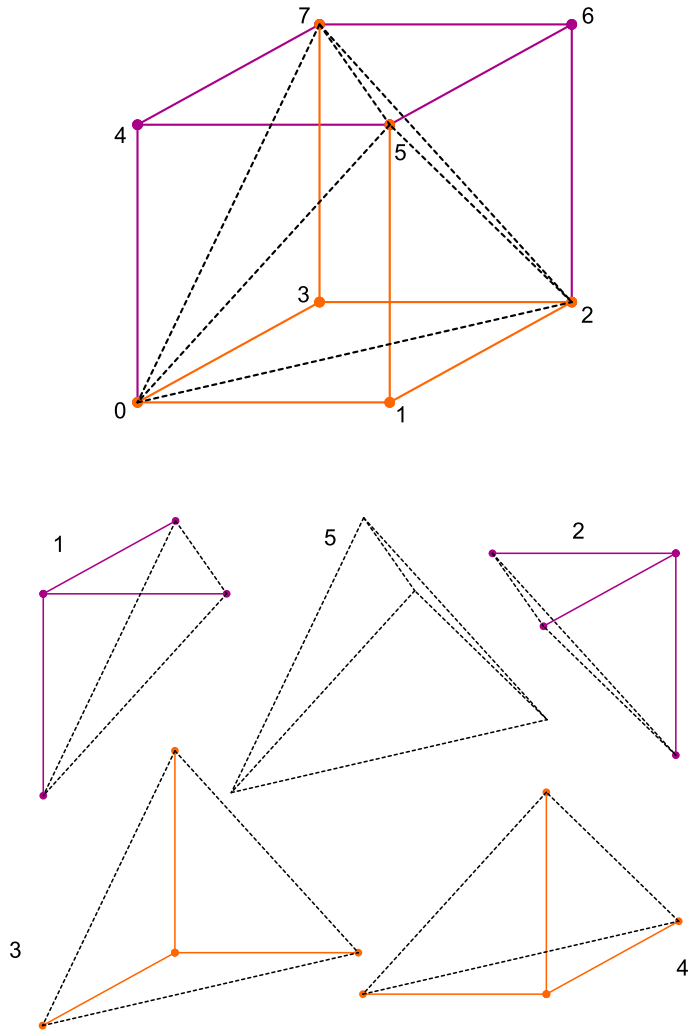


Figura 25: Descomposición de hexaedro en 5 elementos tetraédricos

$$1 = \{5, 7, 0, 4\}$$
$$2 = \{7, 5, 2, 6\}$$
$$3 = \{0, 7, 2, 3\}$$
$$4 = \{2, 5, 0, 1\}$$
$$5 = \{5, 7, 2, 0\}$$

Sin embargo, no todos los hexaedros pueden descomponerse de la misma manera. Para la descomposición del dominio es de vital importancia tener en cuenta cómo se descomponen los hexaedros vecinos. El problema surge con la forma en que se dividen las caras adyacentes entre los hexaedros.

Figura 26 muestra la descomposición de dos hexaedros adyacentes, que se descompusieron de la misma manera. Al hacerlo de esta manera, se puede ver que las caras que comparan no están divididas de la misma manera. Mientras que el elemento de la derecha divide la cara con la línea roja, el de la izquierda lo hace con la línea azul.

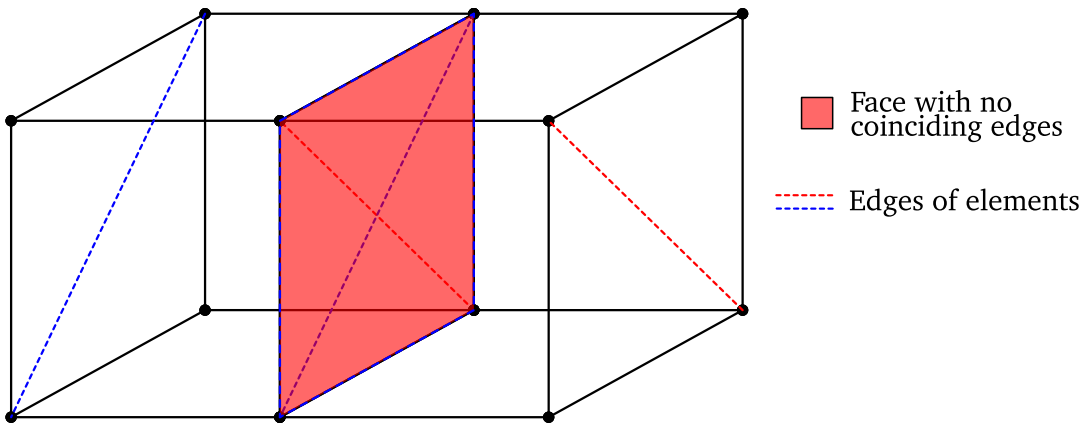


Figura 26: Problem with neighouring hexaedron decomposed equally

Al hacerlo, Calculix interpreta que no hay continuidad entre los dos hexaedros, por lo que considera esa superficie como si fuera parte del borde de la región en estudio. Por eso no todos los hexaedros se pueden descomponer de la misma manera.

Para resolver este problema, se define un segundo tipo de descomposición del hexaedro. La Figura 27 muestra el segundo tipo de descomposición. De esta manera, los tetraedros se forman como

$$1 = \{0, 1, 3, 4\}$$
$$2 = \{2, 3, 1, 6\}$$
$$3 = \{5, 4, 6, 1\}$$
$$4 = \{6, 4, 7, 3\}$$
$$5 = \{3, 4, 1, 6\}$$

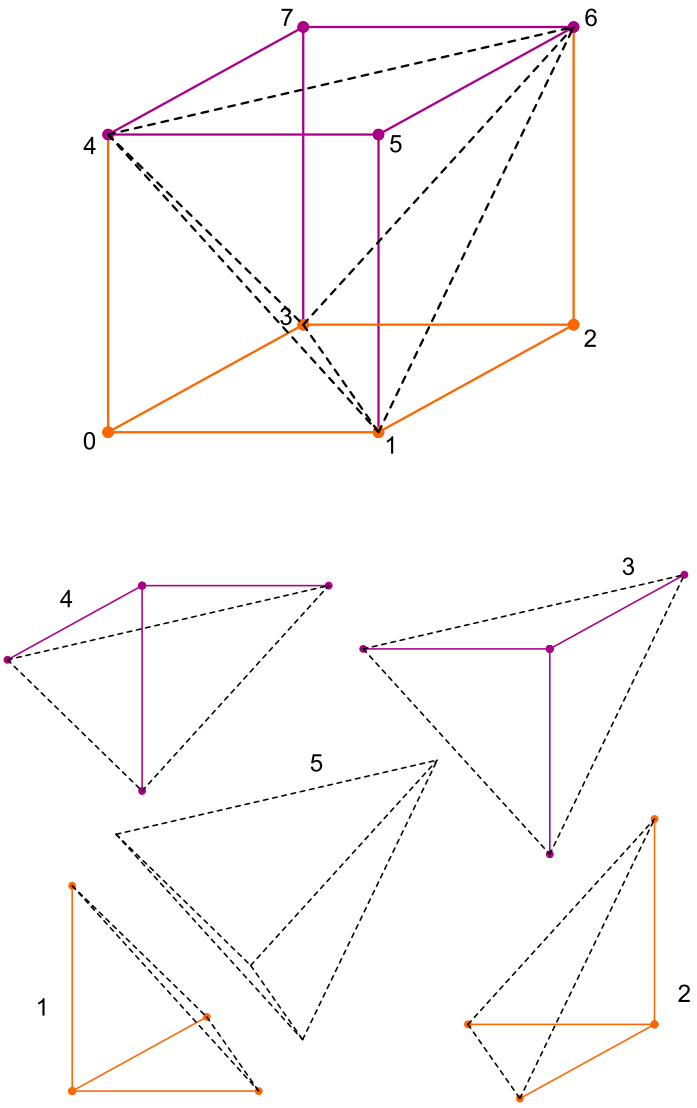


Figura 27: Hexaedron decomposition in 5 tetraedral elements

De esta manera, se debe garantizar que todos los hexaedros adyacentes no compartan la forma en que se descomponen con los hexaedros vecinos. Al observar la Figura 28, se puede ver que cuando estos hexaedros se colocan uno al lado del otro, las divisiones de las caras coinciden. La Figura 28 muestra cómo se distribuye la descomposición de los hexaedros en las tres direcciones.

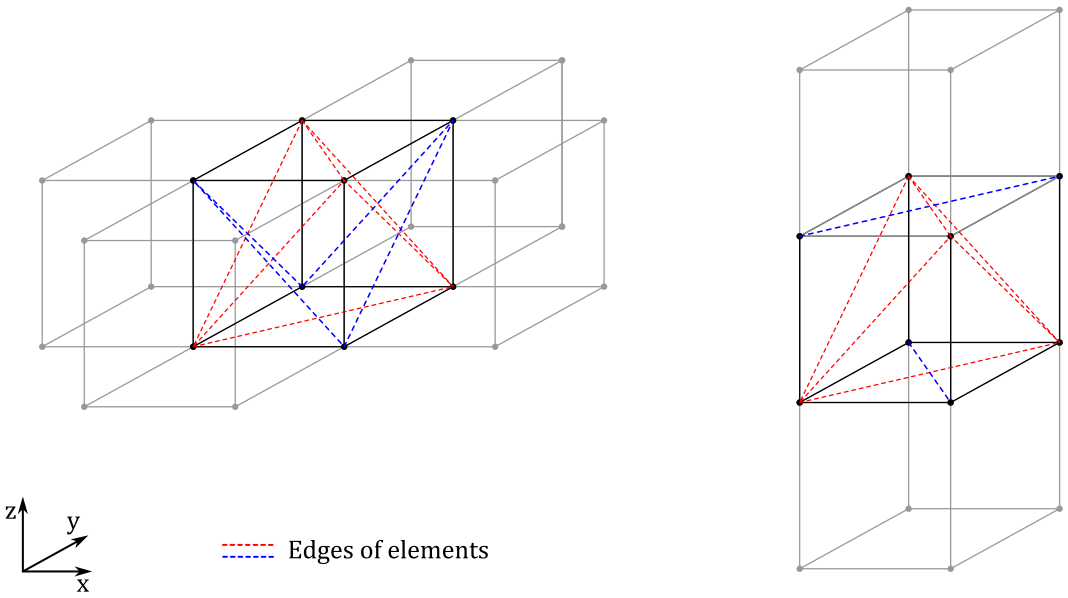


Figura 28: Final decomposition of hexaedral elements

Una vez que se han asignado las coordenadas a los nodos y los nodos a los vértices de los tetraedros, esta información debe exportarse a un archivo. El formato utilizado para este proceso es el formato Abaqus. Al escribir este archivo, el orden en el que se listan las propiedades de cada nodo y elemento es de vital importancia.

En cuanto a los nodos, deben estar precedidos por la invocación de la palabra clave *NODE, que le dice al programa que la siguiente lista son los nodos con sus propiedades. Estos nodos deben listarse con su ID primero, luego sus coordenadas x, y, y z, separadas por comas.

Los elementos, por otro lado, son más complejos. Se listan después de la palabra clave *ELEMENT, que va acompañada de una aclaración del tipo de elemento, en este caso, C3D4, seguida de un nombre para el grupo de todos los elementos.

También es muy importante cómo se describen estos elementos. Los nodos que conforman cada elemento deben listarse en un orden particular. Primero, se escribe el id del elemento, y luego los cuatro nodos que conforman el elemento se separan por comas. El orden en el que se escriben estos nodos es tal que los primeros tres deben leerse en sentido antihorario si se ven desde el cuarto nodo. La Figura 29 muestra un diagrama que detalla cómo deben listarse los nodos de tal manera que sean válidos para la malla.

Las mallas generadas deben cumplir con la nomenclatura especificada para que el programa las use. El archivo que contiene la malla se llama 'mesh_roi0.inp', siendo el número el indicador de la ROI.

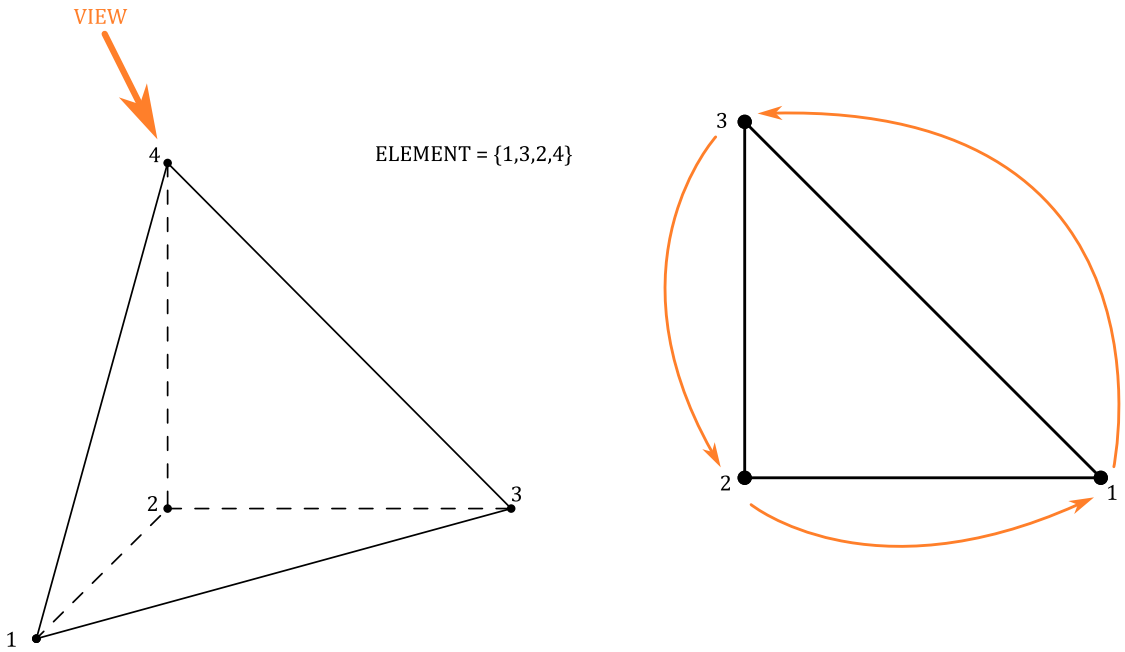


Figura 29: Definición del elemento tetraédrico

4.3. Condiciones de Contorno

Esta sección elabora sobre las implementaciones realizadas para la aplicación de las BCs deseadas. En la Sección 4.3.1, se da una explicación general sobre las BCs para el caso bajo estudio, lo que ofrece *Calculix*, y cómo aborda el problema a resolver. Luego, se describe la implementación del flujo de calor como BCs, y finalmente, la elaboración del archivo de entrada.

4.3.1. Descripción General

Como se explicó en la Sección 4.1, el enfoque de submodelo se utiliza en este trabajo para la simulación detallada de manufactura usando PBF-LB/M. Trabajar con este enfoque implica la relación entre el modelo global y el modelo local. Una vez que se obtienen los resultados de la simulación global, se utilizan para definir las BCs del dominio local, como se muestra en la Figura 18.

Calculix tiene varias posibilidades para la aplicación de este enfoque. Para usar esta herramienta, es necesario definir el archivo de entrada, que es el archivo de resultados del cual se extraerá la información. Esto se hace usando la palabra clave *SUBMODEL. Define el tipo de resultados a extraer de la simulación global y el nombre del archivo de resultados.

Una vez que se ha definido la fuente de resultados, debe especificarse qué resultados van a extraerse de la simulación global y cómo van a aplicarse en la simulación local. *Calculix* tiene numerosas posibilidades para esto, pero cuando se trata de análisis térmico, las opciones son bastante limitadas. Originalmente, el programa solo tenía la posibilidad de definir la temperatura como la BC usando este enfoque. [42] se basó en las herramientas disponibles para aplicar este enfoque. Definiendo el archivo de resultados de análisis térmico de la simulación global, del cual obtuvo solo la temperatura de los nodos.

La BC se implementa por la palabra clave *BOUNDARY,SUBMODEL, que define de qué paso de la simulación general se obtienen los resultados. Al hacerlo, especifica el paso del archivo de resultados del cual el programa debe extraer las temperaturas. Una vez que se han definido la fuente de los resultados y el paso de la simulación global, debe definirse el tipo de BC y los nodos a los cuales se aplica la BC. Los GdLs se utilizan para definir el tipo de BC. Debe definirse el primer y último GdL que esta BC afecta. Para establecer la temperatura, necesita escribirse '11,11'. Al configurarlo de esta manera, el GdL relacionado con la temperatura tiene su valor establecido.

Para la definición de los nodos en los cuales se aplica esta BC, se hace uso de los grupos generados por la aplicación MH. Cuando la aplicación interpreta el archivo de malla utilizado para la simulación, genera diferentes grupos de nodos y elementos. Entre los grupos que genera están aquellos que agrupan los nodos en los bordes de cada capa de impresión.

Es importante aclarar que los elementos de las capas de impresión se activan a medida que el proceso se mueve en la dirección de impresión. La Figura 30 muestra cómo los elementos en la capa por encima de la que se está imprimiendo se desactivan pero se activan para simular la manufactura de la siguiente capa. En otras palabras, al comienzo de la simulación, la única capa activa es la primera, por lo que solo se definen sus BCs. A medida que el resto de las capas de impresión se vuelven activas, sus BCs también se definen.

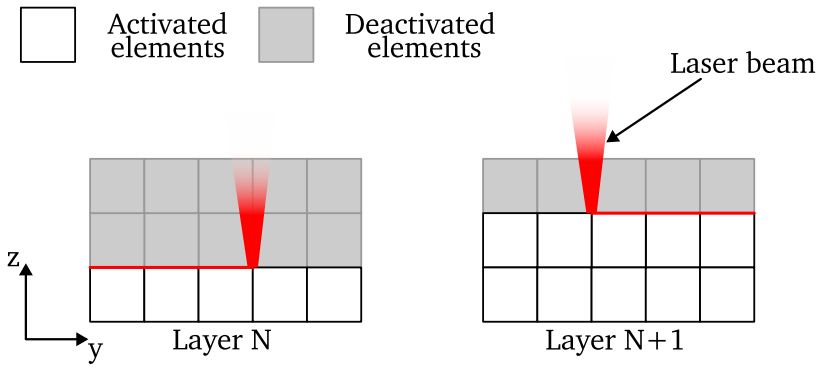


Figura 30: Esquema de la activación de capas a través de la simulación del proceso

La Figura 31 muestra una imagen con un ejemplo de cómo se vería la definición de las BCs para esta simulación local. El nombre del archivo de resultados de la simulación global es 'simtherm.frd', mientras que el archivo de resultados de la simulación local es 'simtherm_roi0.frd'. El número depende de qué ROI se está simulando.

4.3.2. Flujo de Calor

Aunque *Calculix* no ofrece la opción, la intención de este trabajo es aplicar el flujo de calor como una condición de borde resultante de la simulación global. Para esto, es necesario modificar el código fuente de la herramienta e implementar esta posibilidad. Se decidió basar esta implementación en la implementación CLOAD ya disponible en *Calculix*. CLOAD permite al usuario emplear cargas concentradas en nodos y extraer el valor de estas fuerzas de los resultados de simulaciones previas.

En contraste con la aplicación de temperatura como BC para el método de submodelo, seguir la implementación CLOAD requiere ejecutar dos simulaciones locales. Se recomienda primero realizar una simulación global de la cual se extraen los desplazamientos como resultado para

```
*SUBMODEL,TYPE=NODE,INPUT=simtherm.frd
.
.
.
*STEP
.
.
.
*BOUNDARY,SUBMODEL,STEP=XX
LAYER_1_BOUNDARY_NODES,11,11
.
.
.
*END STEP
```

Figura 31: Ejemplo de definición de condiciones de contorno de submodelo en archivo de entrada

ser utilizados en la primera simulación local. Una vez que se termina la primera simulación local, se extraen las fuerzas, y se aplican en la segunda simulación local como BCs. La primera y segunda simulaciones locales deben compartir la misma malla.

De esta manera, se intenta replicar el flujo de información pero solo para el análisis térmico de la ROI. Primero se ejecuta una simulación global, de la cual se extraen temperaturas como resultado. Con estas temperaturas, se lleva a cabo la primera simulación local, y los resultados se utilizan para llevar a cabo la segunda simulación local. La Figura 32 muestra un diagrama del flujo de información entre cada simulación.

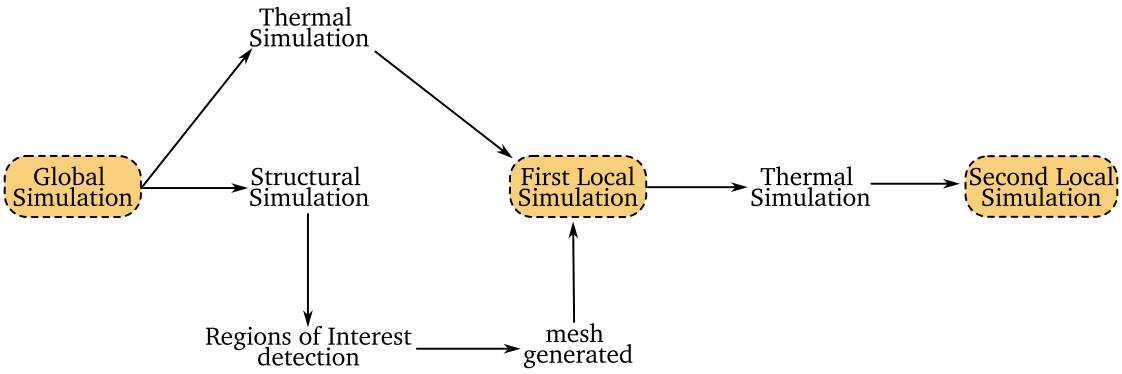


Figura 32: Flujo de información entre simulaciones

Para agregar esta posibilidad a *Calculix*, lo primero que se modificó fue la palabra clave CFLUX. Se agregó la posibilidad de reconocer la palabra SUBMODEL. Para hacer esto, se basa en la implementación CLOAD.

Ambas palabras clave comparten varias similitudes en términos de implementación. Tienen una estructura muy similar cuando se las invoca. Al hacerlo, dos parámetros muy importantes deben definirse además de los nodos a los cuales se aplican. Deben definirse la magnitud y amplitud a aplicar. Por un lado, la magnitud se refiere al valor de la fuerza o flujo a aplicar a los nodos seleccionados. Por otro lado, la magnitud es definida por el usuario y es una modificación aplicada a la magnitud como función del tiempo.

Al implementar los cambios a CFLUX, se remueve la opción del usuario de definir esta amplitud, ya que se le asigna el valor del paso donde deben buscarse los resultados de la simulación previa. Las modificaciones al archivo CFLUX también involucran agregar una bandera que luego es utilizada por el programa para reconocer que debe realizar interpolaciones y extraer los resultados de la simulación previa.

Al extraer los resultados de la simulación anterior, deben tenerse en cuenta los GdLs de cada nodo. En *Calculix*, los nodos tienen trece GdLs. De estos trece grados, el grado 0 se asigna a la temperatura. Al trabajar con flujo de calor, este grado también se utiliza ya que es el único relacionado con la temperatura.

Al extraer los resultados de la primera simulación global, hay dos opciones entre las cuales elegir. Pueden extraerse por la opción HFL (usando EL FILE) o por la opción RFL (usando NODE FILE). La primera opción devuelve, como resultado, el flujo de calor por unidad de área extrapolado del punto de integración a los nodos. Entrega este resultado con tres valores por nodo. Por otro lado, RFL entrega el flujo de calor resultante por nodo, y esto se hace con solo un valor por nodo. Ya que, como se mencionó anteriormente, hay solo un GdL para almacenar el valor del flujo de calor, se decide trabajar con la opción RFL.

El archivo interpolsubmodel.c, que es responsable de extraer los resultados del archivo de resultados de la simulación previa y luego asignarlos a los nodos correspondientes, también tuvo que ser modificado. Ya que la opción de trabajar con el flujo de calor con el método de submodelado no era una opción antes de la implementación de este trabajo, esta opción tuvo que agregarse.

Para este propósito, se utiliza una bandera para indicar si el usuario decidió implementar este caso en su simulación. Si es así, el archivo no leerá los resultados para las temperaturas resultantes de la simulación previa sino que dejará ese GdL para ser ocupado por los flujos de calor resultantes. Esto significa que no podrías trabajar al mismo instante definiendo BCs, la temperatura, y el flujo de calor si aplicas el método de submodelo.

4.3.3. Generación del Archivo de Entrada

El archivo de entrada se escribe dentro de la aplicación MH misma. Para escribir este archivo, ciertas secciones tienen que modificarse comparado con el archivo de entrada previo. Principalmente, lo que se modifica es la declaración del archivo de resultados previo y la definición de las BCs.

Para escribir el archivo de entrada para la segunda simulación, en lugar de volver a ejecutar la sección responsable de escribir la primera, elegimos copiar y modificarla. Esto se hace debido a la simplicidad del enfoque, ya que los pasos que se definieron en la simulación previa serán los mismos, excepto por las BCs. Además, la implementación de este proceso se coloca en el código para que siempre haya un archivo de entrada de la primera simulación.

Para generar el archivo de entrada para la segunda simulación, primero se almacenan las líneas del archivo de la primera simulación. A medida que se copian al archivo de la segunda simulación, se modifican todas las instancias necesarias, como la definición del modelo global y las BCs. El modelo global es lo primero que se modifica en el segundo archivo. En el primero, el nombre del archivo de resultados del cual se obtuvieron los valores de la simulación global era 'simtherm.frd'. Sin embargo, en la segunda simulación, se reemplaza por 'simtherm_roi0.frd'.

Por otro lado, la forma en que se definen las BCs para cada paso también debe modificarse. En la primera simulación, las BCs se definieron solo en el paso donde se activó la capa correspondiente. Esto se debe a la diferencia entre la escala de la pieza y el dominio de la ROI. La Figura 33 muestra cómo los elementos de la ROI están cubiertos por la misma capa, en la cual la entrada de calor se modela por una exposición instantánea.

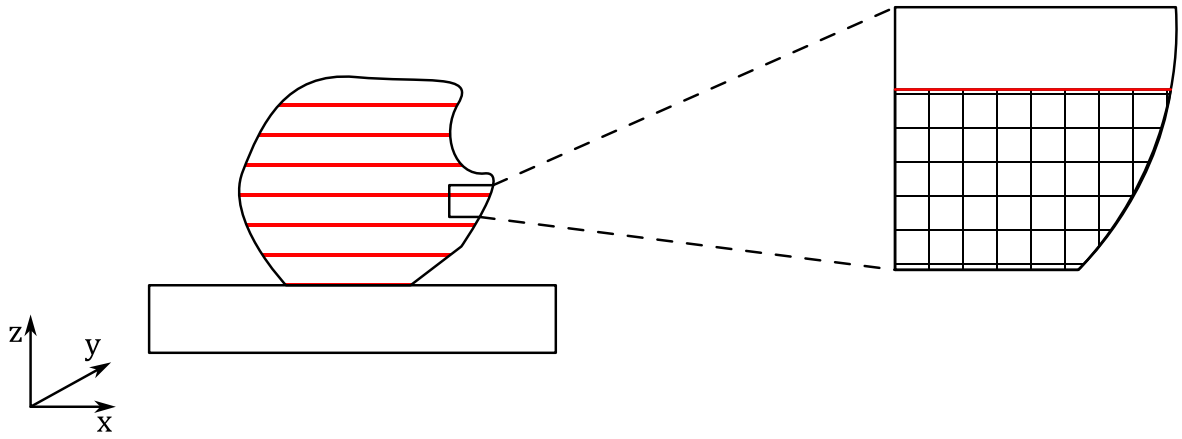


Figura 33: Comparación de escala del tamaño de elemento de simulación y simulación local

Esto significa que la información sobre la temperatura en las BCs debe tomarse del mismo paso. Sin embargo, en la primera simulación local, en cada paso que pasa, el flujo de calor resultante varía con respecto al paso anterior.

Tener la misma malla que en la primera simulación local y tener los valores a considerar para las BCs de la segunda simulación local cambiar en cada paso significa que las BCs deben actualizarse constantemente. Por esto las BCs en la segunda simulación local se actualizan en cada paso.

Cada vez que un paso está a punto de terminar, la implementación verifica si las BCs ya han sido definidas en el paso. En caso de que no hayan sido definidas, lo hace antes del final del paso. La Figura 34 muestra la definición de las BCs, donde se llama CFLUX, la opción de submodelo, los nodos, y el GdL se definen. También, se define uno como la magnitud del flujo pero luego se reemplaza por el valor de la primera simulación local.

```
*SUBMODEL,TYPE=NODE,INPUT=simtherm_roi0.frd
.
.
.
*STEP
.
.
.
*CFLUX,SUBMODEL,STEP=XX
LAYER_1_BOUNDARY_NODES,11,1.
.
.
.
*END STEP
```

Figura 34: Ejemplo de definición de condiciones de contorno de submodelo CFLUX en archivo de entrada

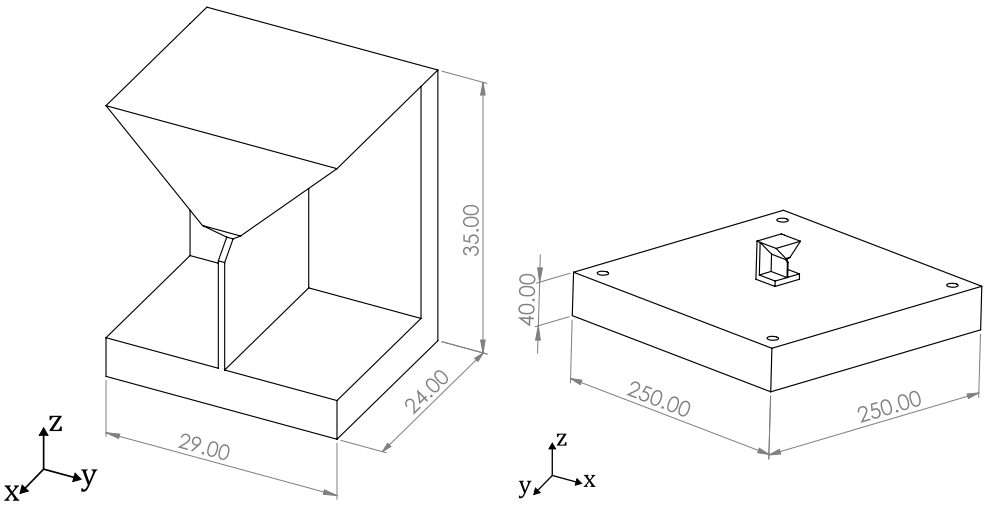
A medida que se activan las diferentes capas del dominio, sus BCs también deben definirse. Cada vez que se activa una capa, se agrega una línea después de que se define el último conjunto de nodos.

5. Resultados y Discusión

Este capítulo presenta los resultados obtenidos del trabajo realizado y los discute. Para garantizar claridad en la presentación de los resultados y su análisis, se sigue el orden en que fue implementada la herramienta. Primero, se estudia la extracción de las ROIs. Luego, se examina la generación de la malla para estas ROIs, seguido por un análisis de la aplicación del flujo de calor como BCs.

5.1. Simulación Global

Primero, es importante definir el modelo que será estudiado mediante la implementación de estas herramientas de simulación. El modelo se muestra en la Figura 35a que lo acompaña, la cual incluye una representación esquemática junto con las dimensiones relevantes. Este modelo se utiliza típicamente para examinar el impacto de las variables del proceso en la ocurrencia de fracturas.



(a) Esquema del modelo global con dimensiones (b) Esquema del modelo global y placa de construcción con dimensiones

Figura 35: Esquemas de las geometrías utilizadas para las simulaciones

Para llevar a cabo la simulación global, la placa de construcción debe incluirse en el modelo. La Figura 35b muestra la pieza en la placa de construcción junto con sus dimensiones.

El mallado para este modelo se realizó utilizando la herramienta de software HyperMesh. Como resultado del proceso de mallado, se creó una malla que consiste en 270089 elementos. El tamaño máximo de elemento especificado para la sección de la pieza se estableció en 0,8 mm. La Figura 36 muestra la malla resultante para el modelo global.

Durante la configuración de la simulación, se eligió una altura de capa de 1.6 mm. Se consideraron dos casos distintos con respecto a la potencia del láser. En la Simulación A, se utilizó una potencia láser de 285 W, mientras que en la Simulación B, la potencia se estableció en 407 W.

Para modelar la deposición de calor en la pieza durante el proceso de fabricación, se aplica una fuente de calor a través de exposición flash. *AscentAM* proporciona la opción de especificar

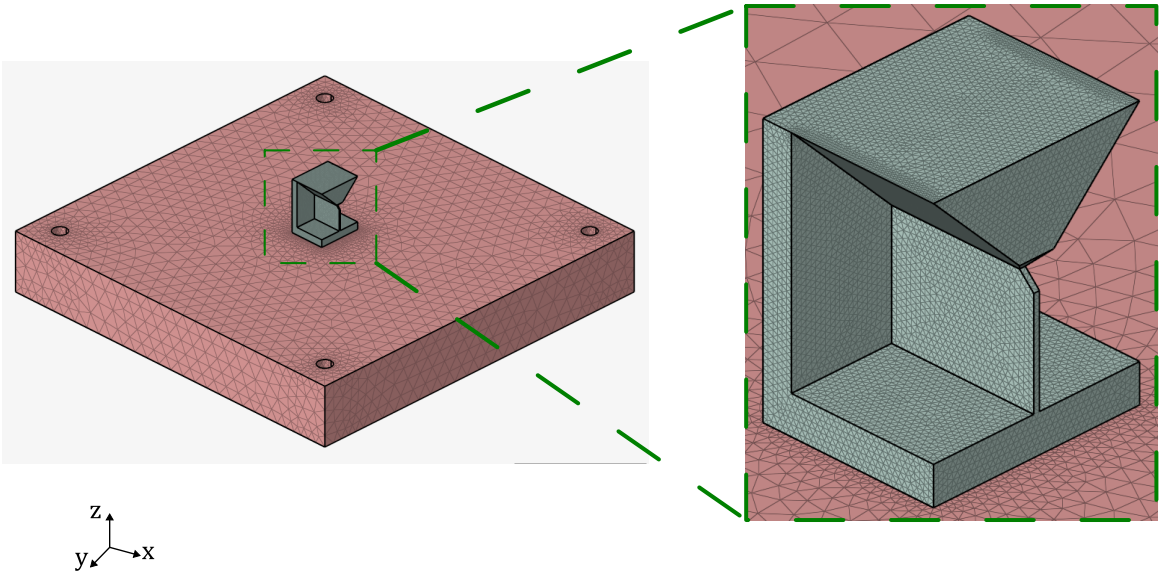


Figura 36: Malla del modelo global

la temperatura a la que se somete cada capa de impresión. Las temperaturas utilizadas para cada simulación se detallan en la Tabla 2.

Cuadro 2: Potencia del láser y la temperatura utilizada para la exposición flash.

Potencia del láser	**Temperatura [K]**
285 W	1523.15
407 W	2175.16

5.2. Extracción y Generación de Malla

Después de procesar las simulaciones, se analizaron los resultados relevantes para el estudio de caso. La Figura 37 A muestra los resultados del indicador de daño para la Simulación A, mientras que la Figura 37 B presenta los mismos resultados para la Simulación B.

En la Figura 37, se indica el punto con el valor más alto. En la simulación A, ninguna región superó el umbral de 1,0, que se define en la sección como el umbral típico para determinar la probabilidad de que ocurran fracturas. Por el contrario, la simulación B demostró que este umbral fue superado. Ambas simulaciones mostraron concentraciones de este indicador en las mismas regiones.

Durante la extracción automática de ROIs para las simulaciones locales, se observaron resultados variables. La Simulación A, por ejemplo, no identificó ninguna ROI. Este resultado se anticipó, ya que no había áreas que superaran el umbral predefinido discutido anteriormente

Por el contrario, la simulación B sí tenía una ROI definida, que fue definida por

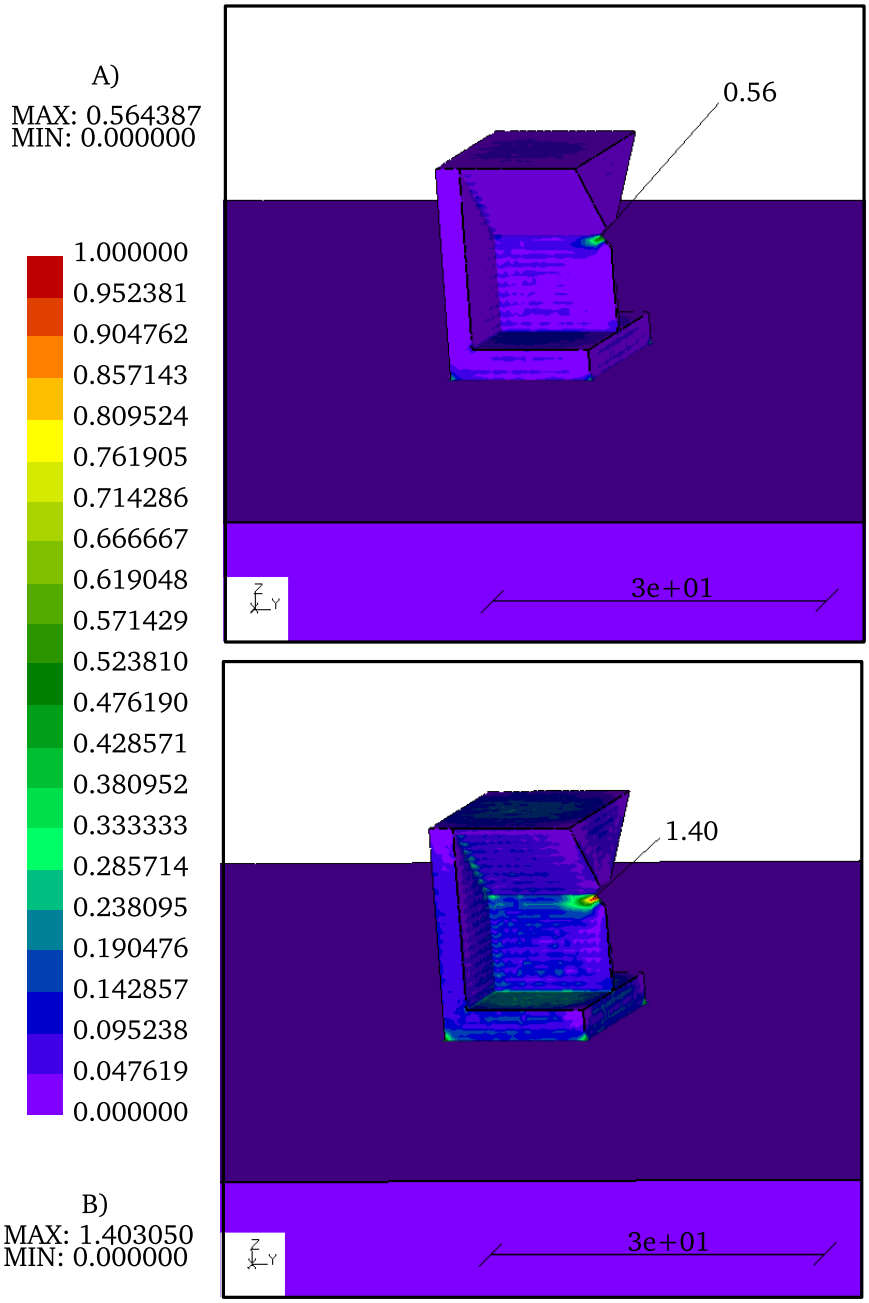


Figura 37: A) Resultados del indicador de daño para la simulación A con la anotación mostrando el valor máximo B) Resultados del indicador de daño para la simulación B con la anotación mostrando el valor máximo

$$Corner\ 1 = \{\ -1,4\ ;8,64\ ;\ 19,21\ \}$$
$$Corner\ 2 = \{\ 1,4\ ;11,5\ ;\ 21,4\ \}$$

que define la ROI representada en Figura 38. Figura 38 muestra la ROI extraída por el programa, superpuesta con la geometría de la pieza simulada.

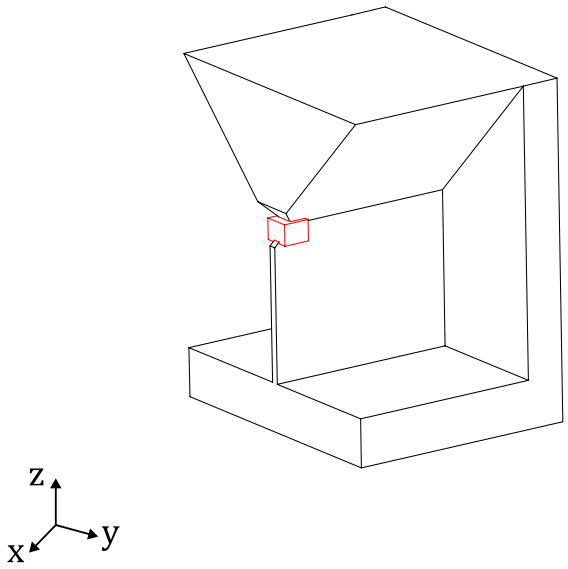


Figura 38: Superposición del modelo global y la región sugerida por el programa

Como se puede ver en la Figura 38, la ROI definida excede el dominio de la pieza bajo estudio en más de un área. Esto no se considera un error por parte del autor del trabajo, sino más bien una limitación de la implementación. El uso de esta herramienta requiere el compromiso del usuario, en lo que respecta a la configuración de la simulación.

Los resultados de las ROIs simplemente deben ser una asistencia para el usuario, en lugar de la decisión final sobre qué zonas deben estudiarse con mayor profundidad. La principal ventaja de extraer estas regiones es evidente cuando la simulación tiene múltiples zonas que necesitan ser estudiadas con mayor detalle. De esta manera, el usuario tiene una mejor comprensión de qué regiones son candidatas para estudios posteriores.

Además, la principal fortaleza de extraer automáticamente las ROIs es la capacidad de identificar fácilmente las regiones a estudiar dentro del modelo simulado. Las áreas por encima del umbral y en la superficie pueden ser fácilmente reconocidas y extraídas por el usuario. La Figura 39 muestra las ROIs utilizadas para las simulaciones locales.

Una vez seleccionada la región a estudiar, comienza el proceso de mallado. En este caso, se selecciona la opción número 3 de la lista en la Sección 4.2.2, ya que la definición de la región por parte de la herramienta no es útil y se debe generar el archivo de malla. La región a mallar se define por las esquinas con coordenadas

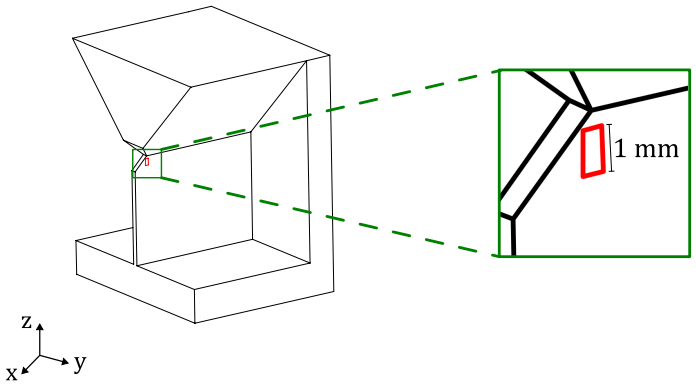


Figura 39: Superposición del modelo global y la región utilizada

$$Corner\ 1 = \{\ -0,4\ ;10,34\ ;\ 20,56\ \}$$
$$Corner\ 2 = \{\ 0,4\ ;9,84\ ;\ 19,56\ \}$$

Se utiliza un tamaño máximo de elemento de 0.038 mm para definir la malla, resultando en una malla con 108.300 elementos. La Figura 40 muestra la malla resultante con las aristas de los elementos visibles y la descomposición de un hexaedro y el resultado de su descomposición en cinco tetraedros. Como se puede ver, el algoritmo implementado para la generación de malla descompone exitosamente el dominio seleccionado en elementos definidos por el usuario. En la Figura 40, se muestra cada elemento resultante de la descomposición y el número del nodo que lo compone.

5.3. Condiciones de Contorno

Con el objetivo de comparar diferentes casos, se realizaron simulaciones locales tanto para la Simulación A como para la Simulación B, aunque la primera no presente ninguna ROI. La Tabla 3 muestra los parámetros utilizados para definir el haz láser para cada una de estas simulaciones. Es importante mencionar que se utiliza una altura de capa de 0,2 mm para las simulaciones. Para comparar mejor los resultados y entender el comportamiento de las implementaciones de este trabajo, se simularon otros dos casos. Con los parámetros del láser de 407 W de potencia, se realizó una simulación con el modelo de fuente de calor móvil anterior, y también una con una malla hecha con Hypermesh.

Cuadro 3: Parámetros a, b, c, y eficiencia η para las potencias láser seleccionadas

Potencia láser	a	b	c	η
285 W	0.045	0.11	0.13	0.52
407 W	0.045	0.12	0.22	0.68

La Figura 41 muestra los resultados de la simulación térmica para un láser de 285 W con los parámetros descritos en la Tabla 3 para el dominio local. En la Figura 41 se muestra la distribución de temperatura para la segunda capa de elementos en Kelvin, con una vista superior de la sección. La temperatura máxima en ese momento alcanza un valor de 2197.89 K, mientras que la mínima es -189.32 K. Se puede ver claramente en la vista superior que

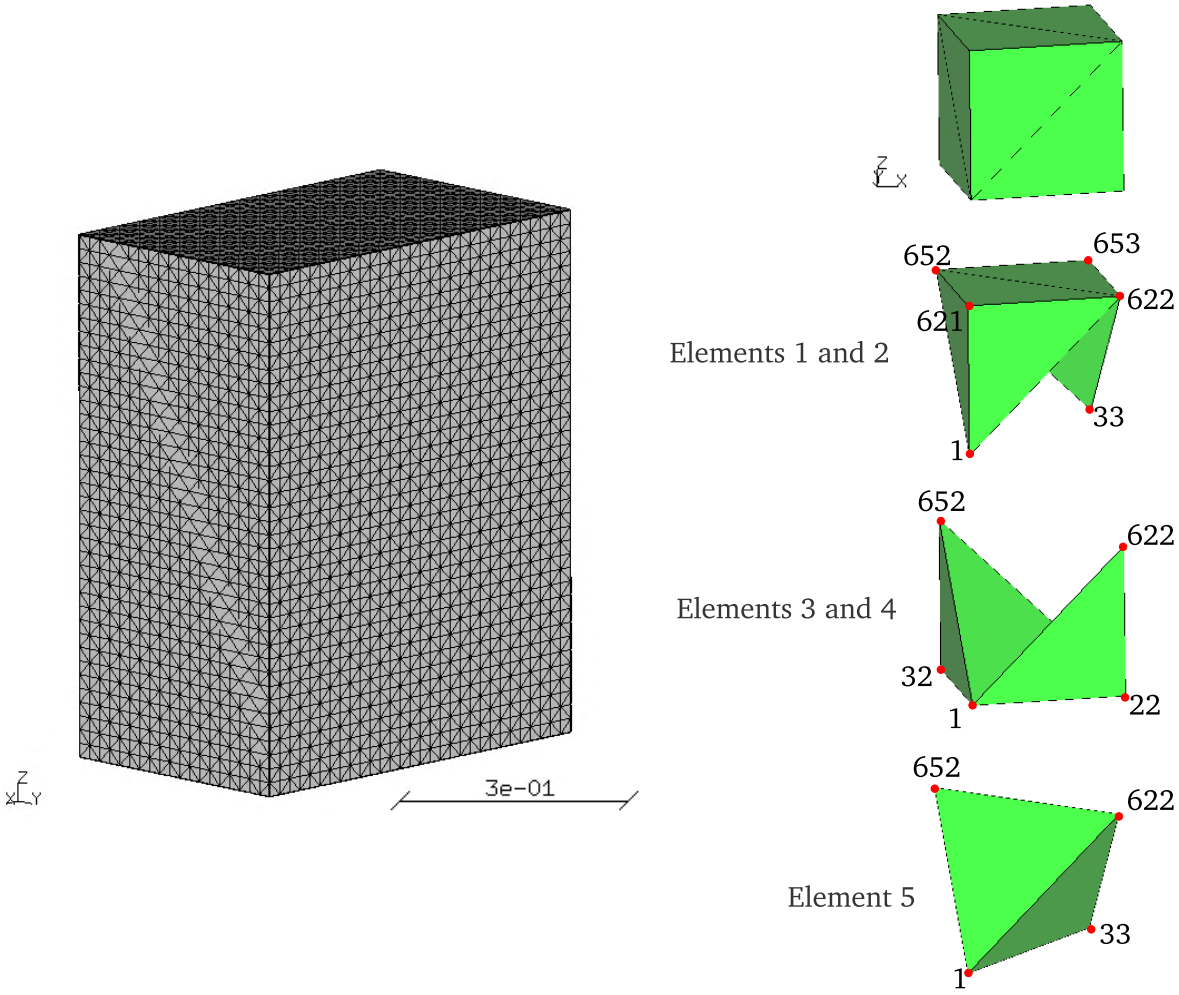


Figura 40: Malla de la región de interés y descomposición del primer hexaedro en cinco tetraédricos

la temperatura mínima ocurre hacia los límites de la región de contacto del láser. Se puede observar el comportamiento esperado de la interacción entre el haz láser y el material, ya que hay un gradiente ascendente de temperatura desde el comienzo de la trayectoria del haz láser hasta su posición en ese momento.

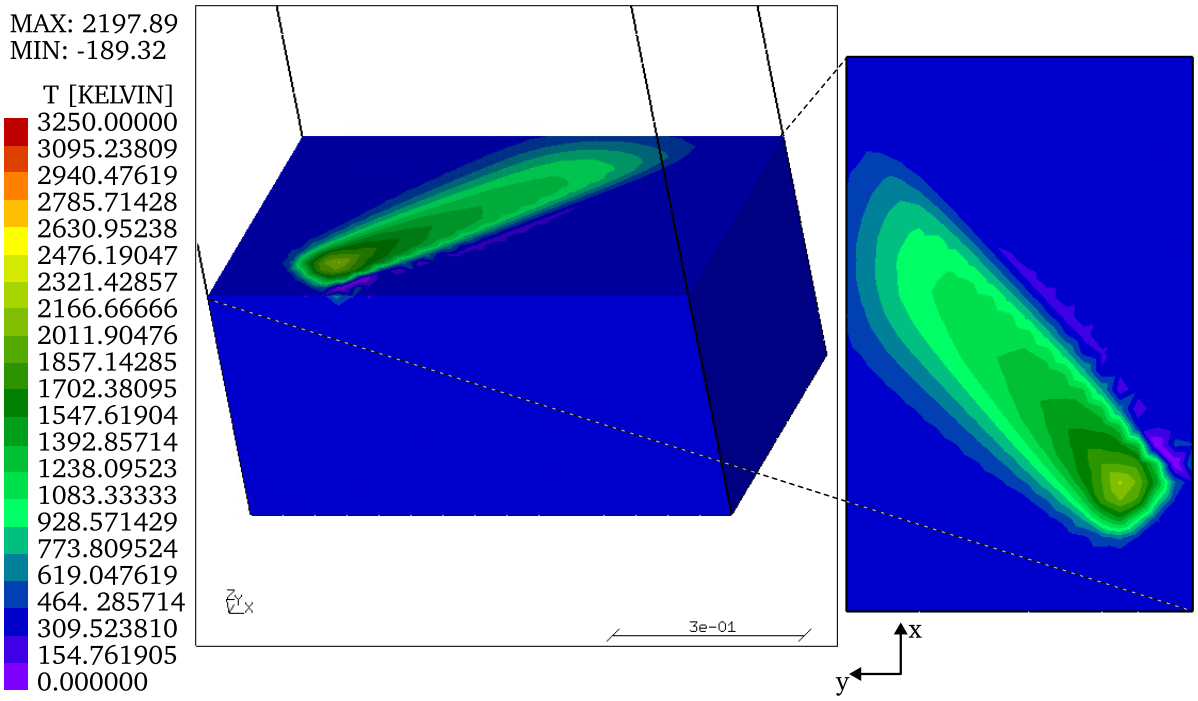


Figura 41: Resultados de temperatura [Kelvin] para la potencia de 285 W

Los resultados para la simulación térmica con una potencia láser de 407 W se muestran en la Figura 42. Como se puede ver en la figura, la temperatura máxima alcanzada es 3253.53 K, mientras que las temperaturas más bajas son -301.63 K. Los valores de temperatura más baja también aparecen a lo largo de los lados de la trayectoria del haz láser, similar a lo que se observó en la simulación de 285 W.

Como era de esperar, la temperatura alcanzada en la simulación con el láser de 407 W es mayor que la alcanzada en la simulación con 285 W. En la simulación con el láser de mayor potencia, la temperatura alcanzada es 1055.64 K mayor que la de la simulación con el láser de menor potencia. Ambas simulaciones presentan un gradiente de temperatura similar a lo largo de la trayectoria del haz láser.

En la Sección 7, se muestran los resultados de las simulaciones con una potencia láser de 407 W pero con la implementación anterior de fuente de calor móvil y una malla generada con Hypermesh, ver Figuras 52 and 53 respectivamente. La temperatura más alta alcanzada en la simulación con la implementación anterior es 3237.97 K, mientras que en la última es 3417.12 K. Los resultados muestran poca diferencia en la temperatura máxima alcanzada al comparar la implementación anterior con la nueva implementación de la fuente de calor móvil, con una diferencia de 15.56 K. Se puede observar una diferencia de 163.59 K entre las simulaciones ejecutadas con las diferentes mallas; esto podría ser causado por un error numérico. Dado que el

El mismo problema persiste en las cuatro simulaciones mencionadas anteriormente: la temperatura mínima obtenida es demasiado baja. En todas ellas, excepto por la simulación con la

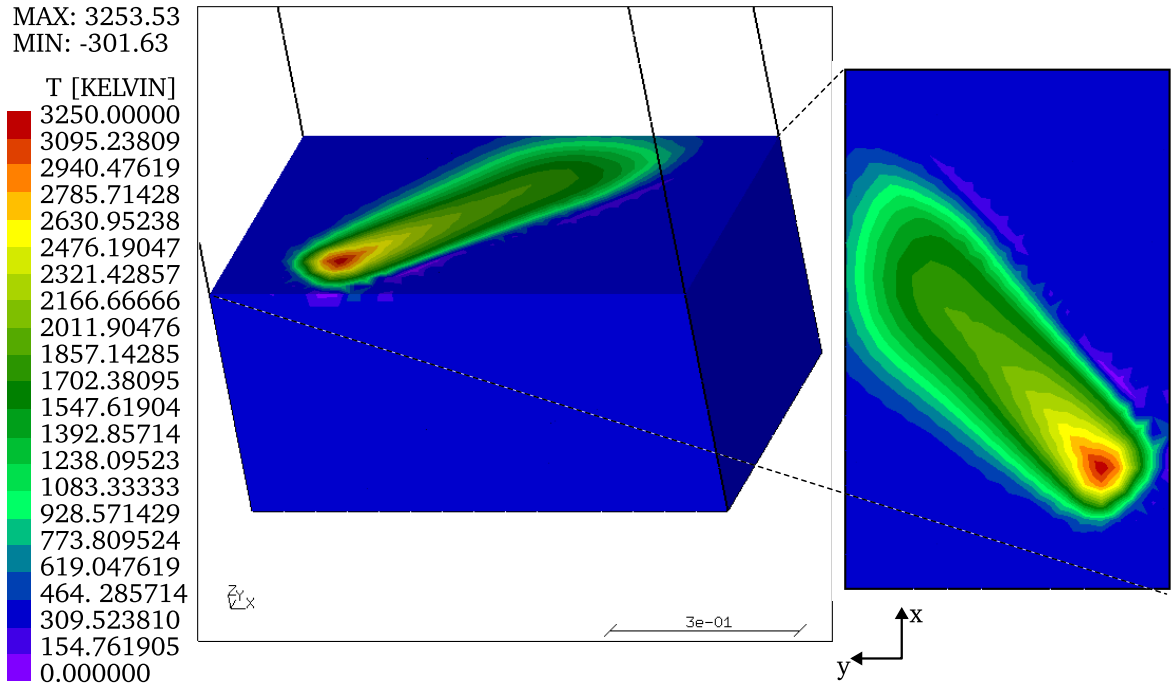


Figura 42: Resultados de temperatura [Kelvin] para la potencia de 407 W

implementación antigua, la temperatura mínima alcanza valores negativos en Kelvin, y en el caso de la implementación anterior, también es demasiado baja. [38] encontró un problema similar durante el desarrollo de su trabajo. Este problema podría deberse al modelado del material, ya que, según [38], fue modificando esto que logró encontrar una solución a este problema. En cada caso, las temperaturas más bajas se presentan en espacios similares, al lado de la trayectoria del haz láser.

Con los resultados de la primera simulación local ya obtenidos, se puede realizar la segunda simulación, que utiliza los resultados de la primera para definir las BCs. Para poder observar el efecto de las BCs recientemente aplicadas, las Figuras 43 and 44 muestran resultados de la primera simulación local en la primera capa con el haz láser acercándose al límite. La temperatura máxima observada en la simulación del láser de 285 W alcanza 2597.22 K, mientras que los resultados para el láser de 407 W alcanzan 4172.87 K.

Los resultados para la segunda simulación local se presentan en las Figuras 43 and 44. La segunda simulación local para la potencia láser de 285 W, en el mismo paso que la primera simulación local para esa potencia láser, alcanza 2713.87 K, 116.65 K mayor que la primera simulación local. Mientras que la segunda simulación local para el láser de 407 W alcanza 3907.79 K, 265.08 K menor que la primera simulación local para ese caso. Una diferencia que se puede ver en comparación con la primera simulación local, en ambos casos, es que la temperatura en todo el dominio, fuera de la trayectoria del haz láser, es mayor que la alcanzada en la primera simulación local.

La principal diferencia entre ambas simulaciones locales se puede observar mejor al comparar las Figura 47 y Figura 48. La primera muestra una sección transversal de los resultados presentados en la Figura 44 mientras que la última muestra una sección transversal de la Figura 46. Los efectos de las BCs de la segunda simulación local se pueden observar claramente hasta los límites del dominio. En la segunda sección transversal, la distribución de temperatura

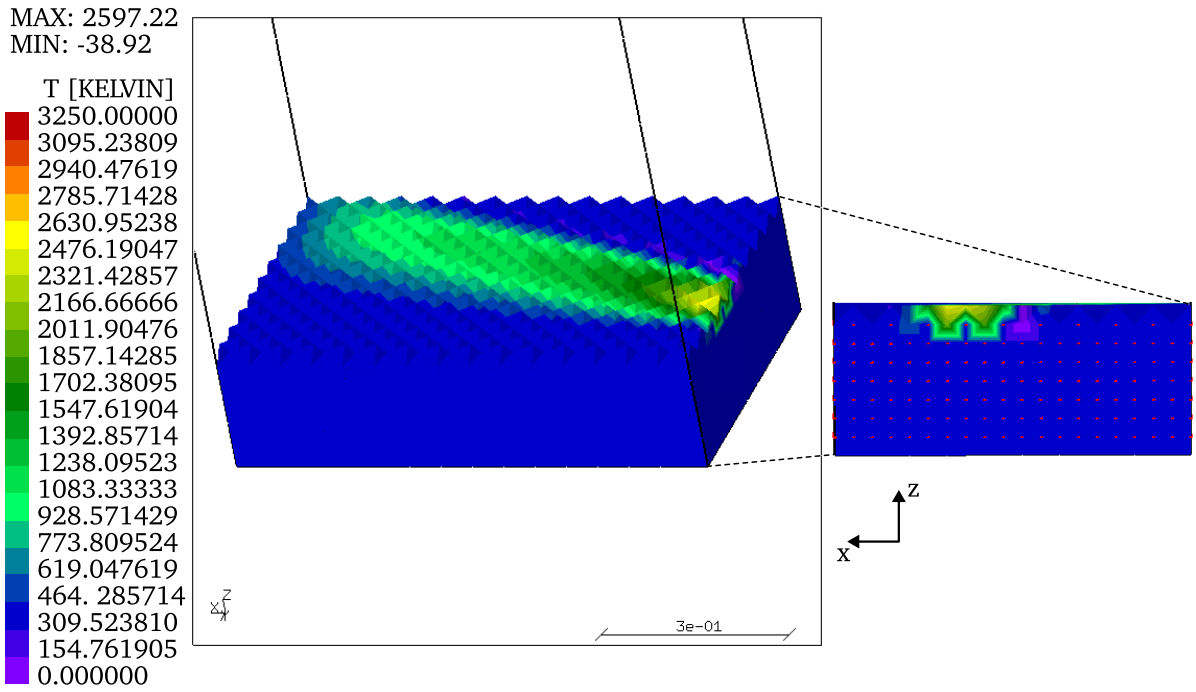


Figura 43: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 285 W en la primera simulación local

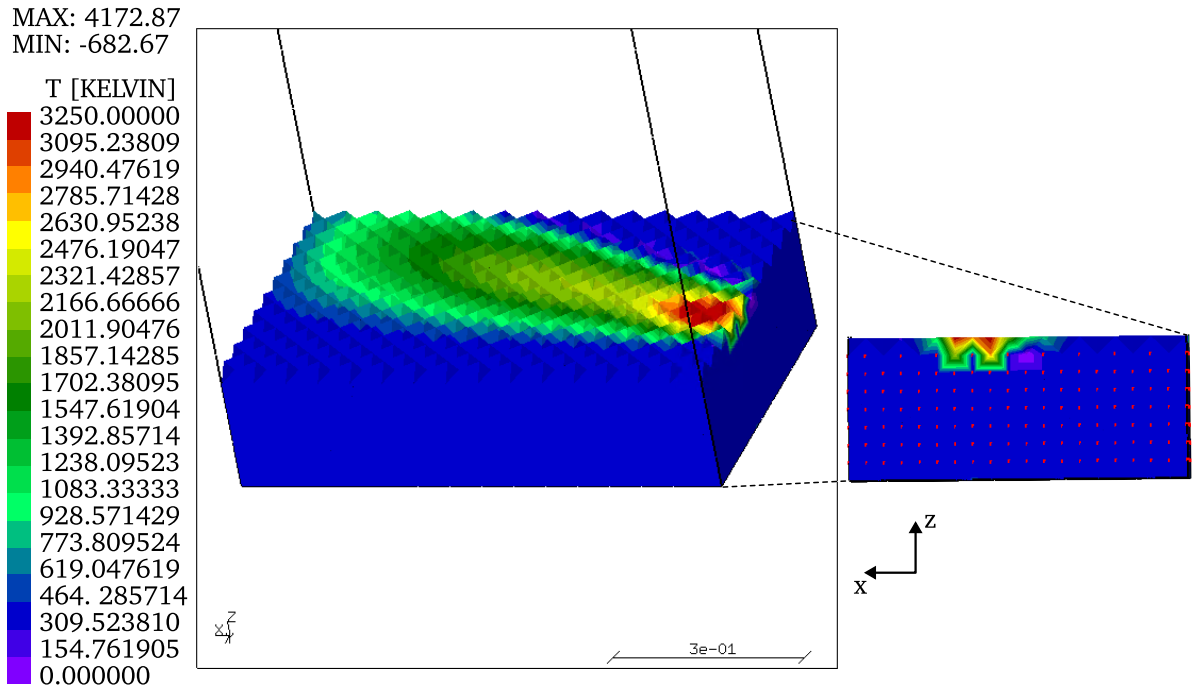


Figura 44: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la primera simulación local

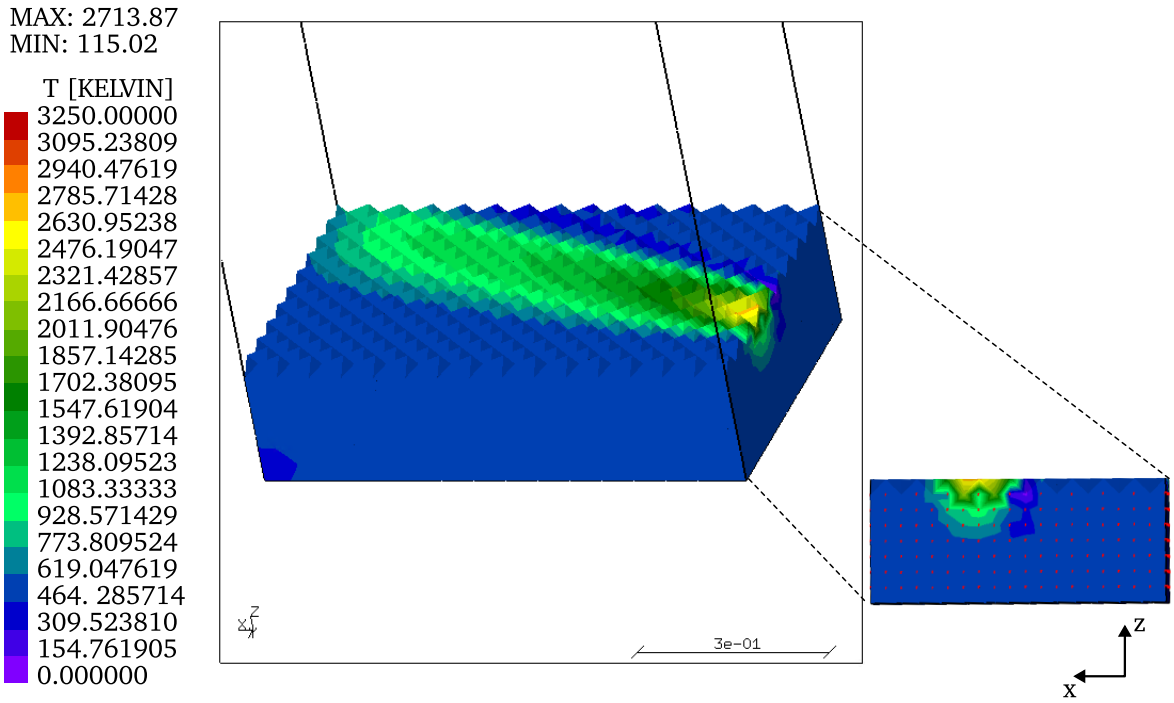


Figura 45: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 285 W en la segunda simulación local

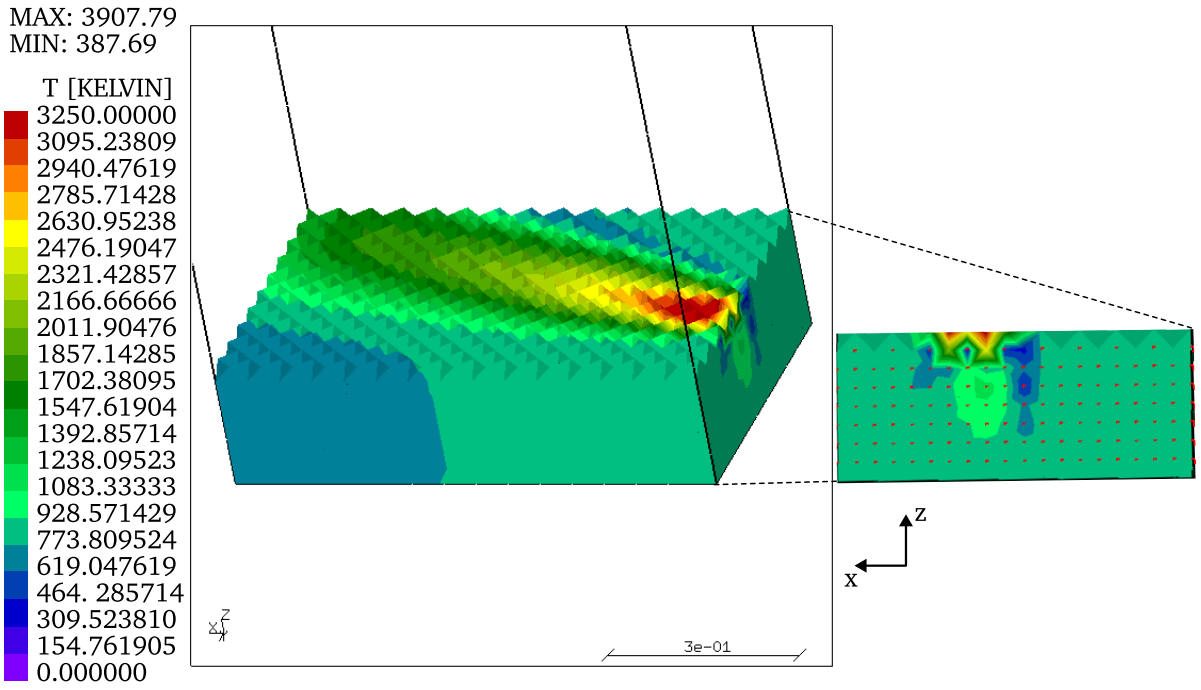


Figura 46: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la segunda simulación local

evoluciona continuamente hasta el final del dominio. Mientras que, en la sección transversal de la primera simulación local, la temperatura de los nodos límite se fija debido a las BCs. Este fenómeno también se puede ver en las vistas de la derecha en las Figuras 43 to 46

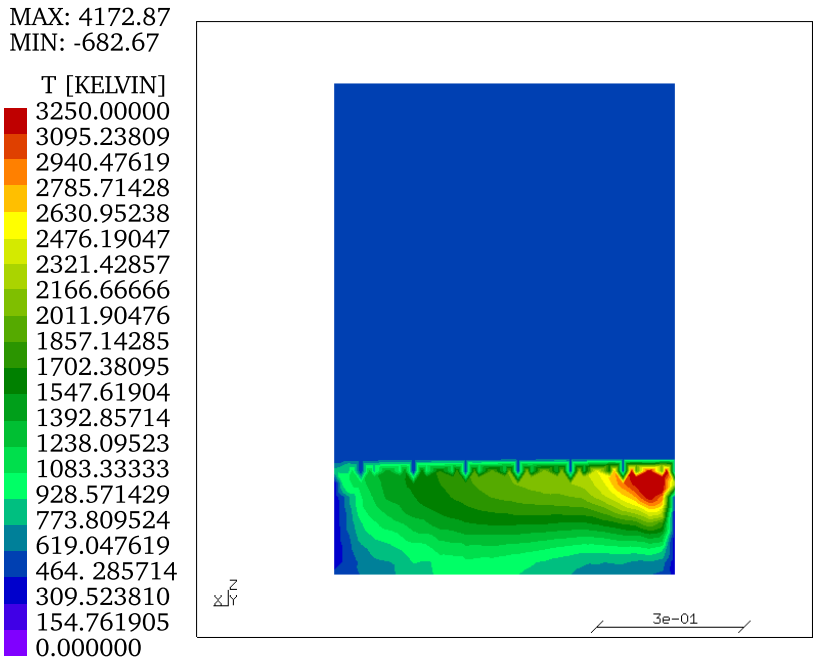


Figura 47: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la primera simulación local sección transversal

La diferencia en los valores de temperatura se debe a la libertad dada a la temperatura de los nodos en el límite de la pieza. Se puede ver en la sección transversal de los resultados cómo, cerca del límite, la progresión del campo de temperatura parece interrumpida por los valores establecidos por las BC en las primeras simulaciones locales. Por el contrario, el campo de temperatura en las segundas simulaciones locales fluye continuamente hacia el final de la pieza, afectando la distribución de temperatura.

Los resultados de la segunda simulación local tuvieron que confinarse a la primera capa de elementos. Esta limitación surgió porque el programa falló consistentemente en el paso 1018 durante el procesamiento de las segundas simulaciones locales. Según los archivos de registro, la falla se atribuyó a problemas con los archivos *.frd*. Se probaron numerosos enfoques en un intento de resolver este problema, pero ninguno fue exitoso (para más información sobre los enfoques probados, ver Sección 8).

[38] presentó resultados de simulación de la implementación de GWQ. Los parámetros utilizados por [38] para definir el haz láser se muestran en la Tabla 4. La Figura 49 muestra los resultados para la simulación térmica presentada por [38] con los parámetros del haz láser mencionados anteriormente.

Cuadro 4: Parámetros a, b, c, y eficiencia η empleados por [38]

Potencia láser	a	b	c	η
285 W	0.1	0.1	0.04	0.15

Los resultados presentados por [38] alcanzan 1887 K, mientras que los valores más bajos de los elementos que ya fueron calentados por la fuente de calor están en el rango de 415 K.

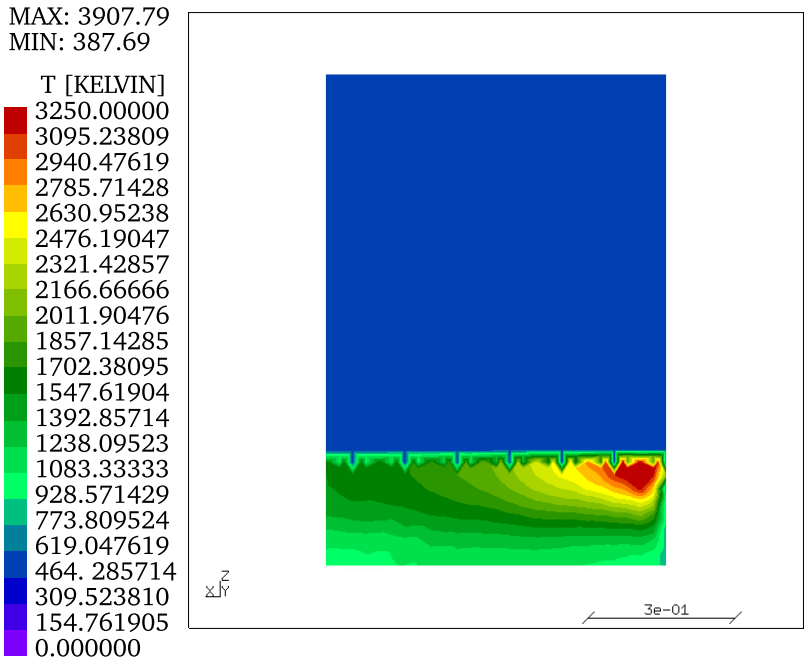


Figura 48: Resultados de temperatura [Kelvin] en el límite para la potencia de 407 W en la segunda simulación local sección transversal

De los resultados presentados en este trabajo, el caso con los parámetros más similares es la simulación con una potencia láser de 285 W. Al comparar estos resultados con los resultados presentados en la Figura 43, el valor máximo de [38] es 710.22 K menor que el presentado en este trabajo. Aunque esta diferencia representa un 37 %, podría ser causada por la diferencia en los parámetros para ambas simulaciones, dado que la eficiencia de la simulación ejecutada en este trabajo tuvo una eficiencia 0.37 mayor que la utilizada por [38].

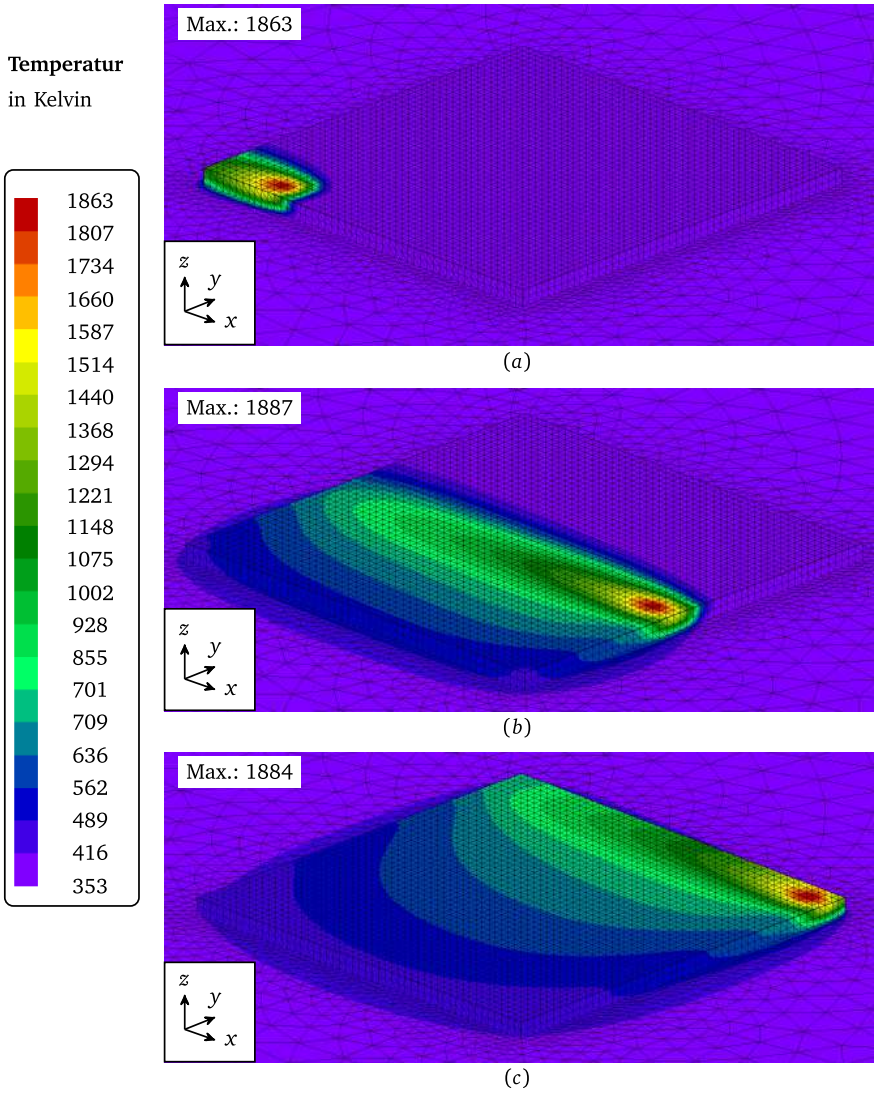


Figura 49: Resultados de temperatura [Kelvin] para el modelo de fuente de calor Goldak implementado por [38] [38]

6. Conclusiones y Perspectivas

Este capítulo presenta las conclusiones derivadas del análisis y examina las posibles direcciones futuras que emergen de esta investigación. Primero, las conclusiones se explican en Sección 6.1 y después, se exploran las posibles perspectivas en Sección 6.2

6.1. Conclusiones

Esta tesis introdujo un enfoque innovador para implementar una fuente de calor móvil en simulaciones de submodelos de PBF-LB/M. Esta metodología permite un análisis térmico preciso de las ROIs dentro de un componente, mejorando significativamente el nivel de detalle para calcular la distribución de temperatura en las mismas.

El enfoque involucra extraer regiones clave de una simulación global, remachar estas áreas específicas con elementos estructurados y tetraédricos, y asegurar la continuidad térmica entre los dominios globales y locales mediante la aplicación cuidadosa primero de la temperatura y después del flujo de calor como BCs. Para simular con precisión la trayectoria del láser, se utiliza un modelo de fuente de calor basado en Goldak.

Los resultados de este trabajo proporcionan una base para el enfoque de sub-modelo utilizado para simular las ROIs, que ha mostrado resultados prometedores. Al probar dos casos diferentes, uno con un láser de mayor potencia que el otro, los resultados mostraron que el que tenía el láser más potente alcanzó temperaturas más altas. La temperatura más alta mostrada en los resultados para esta simulación es 4172.87 K, mientras que en la simulación con el láser menos potente, en la misma posición, es 2713.87 K. Los resultados de temperatura de las simulaciones con el láser menos potente fueron comparados con los resultados obtenidos por [38]. Los resultados obtenidos en este trabajo son 710.22 K más altos que los de [38], pero esto se considera aceptable debido a la diferencia en los parámetros de ambas simulaciones.

Este enfoque podría ser altamente beneficioso para simular geometrías complejas, permitiendo a los usuarios aprovechar completamente las capacidades del proceso de PBF-LB/M. Además, este trabajo ha establecido herramientas útiles para futuras mejoras del software; dado que la extracción de regiones y el remallado están integrados en el software, futuros investigadores pueden construir sobre los desarrollos existentes.

6.2. Perspectivas

Basándose en los hallazgos de esta investigación, varias áreas para futuras investigaciones son dignas de mención. Primero y principal, hay dos problemas clave a abordar:

- la ocurrencia de temperaturas negativas en las simulaciones térmicas locales,
- la falla del programa para abrir el archivo de resultados para el paso 1018, lo que lleva a una falla de simulación.

Para resolver el problema de las temperaturas negativas, un enfoque potencial podría ser alterar el método de modelado del material, como fue demostrado por [38], quien abordó exitosamente un desafío similar. Además, para solucionar el problema de que el archivo de resultados no se abra, se podría considerar cambiar el formato de almacenamiento a archivos .h5.

Otra posible investigación que siga al trabajo presentado sería probar adecuadamente los resultados obtenidos por la aplicación de este método. Los parámetros utilizados para configurar la simulación podrían ser calibrados comparando los resultados de las simulaciones con mediciones de resultados experimentales en un entorno controlado. Al hacerlo, las implementaciones de este trabajo serían validadas y podrían usarse para predecir la posible formación de grietas.

Una oportunidad de investigación podría ser estudiar el impacto que cada parámetro tiene en el resultado de la simulación, para entender mejor este método y encontrar oportunidades de mejora. Realizando un estudio paramétrico, en el cual se comparen los resultados de diferentes simulaciones, en las que la diferencia solo podría ser causada por la variación de un parámetro, se podría medir el peso que cada uno tiene e intencionalmente modificarlo. Un parámetro que sería interesante estudiar sería el tamaño de la ROI definida por el usuario, porque si el usuario puede hacer la región más pequeña y lograr la misma calidad en los resultados, esto llevaría a menos tiempo de simulación requerido.

También sería interesante comparar el enfoque de submodelado con el remallado adaptativo, para decidir cuál debería aplicarse en el futuro. Para hacer esto, diferentes casos de prueba deberían ser diseñados para probar las capacidades de ambos métodos. Un posible resultado de este proceso podría ser que estos métodos tienen diferentes fortalezas y uno debería aplicarse dependiendo de las características del caso para aprovechar completamente los recursos a disposición del usuario, o que un método es notablemente superior al otro y debería emplearse para la mayoría de aplicaciones relacionadas con PBF-LB/M.

7. Figuras de resultados del dominio local

En este apéndice se recopilan todas las figuras de los resultados. Las figuras **??** muestran los resultados de las simulaciones térmicas del dominio local en la segunda capa. Las figuras **??** muestran los resultados de las simulaciones térmicas de la primera y segunda simulación local en la primera capa en el borde del dominio, mientras que **??** muestran una sección de estos resultados.

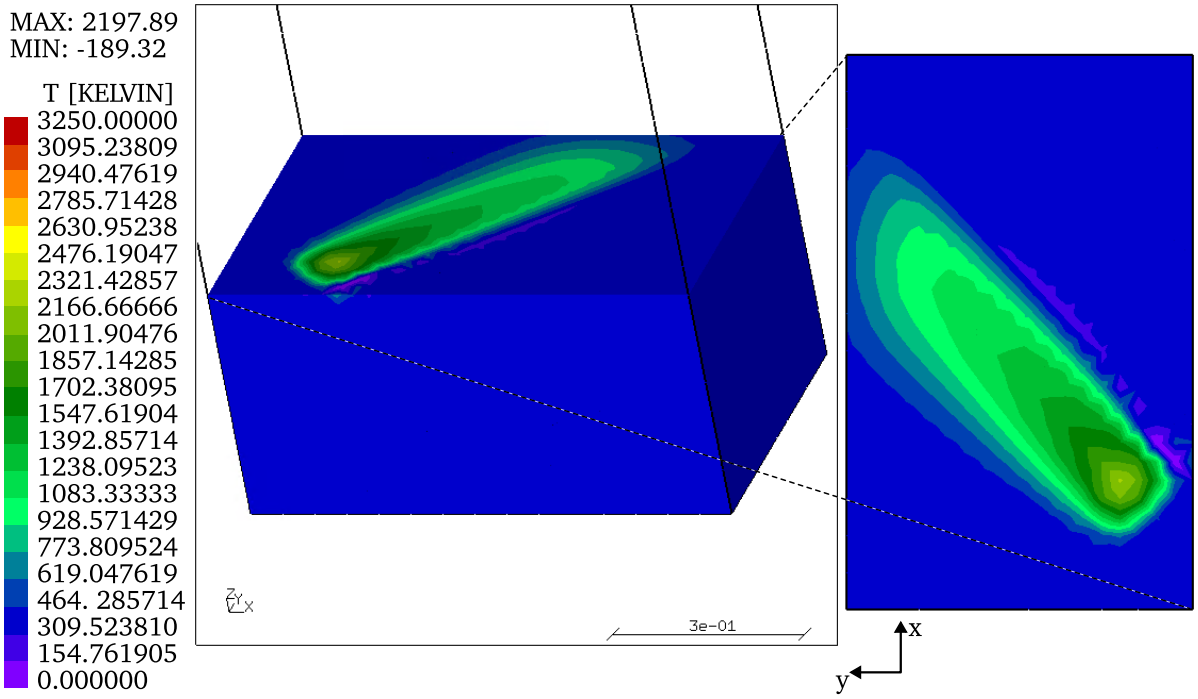


Figura 50: Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 285 W

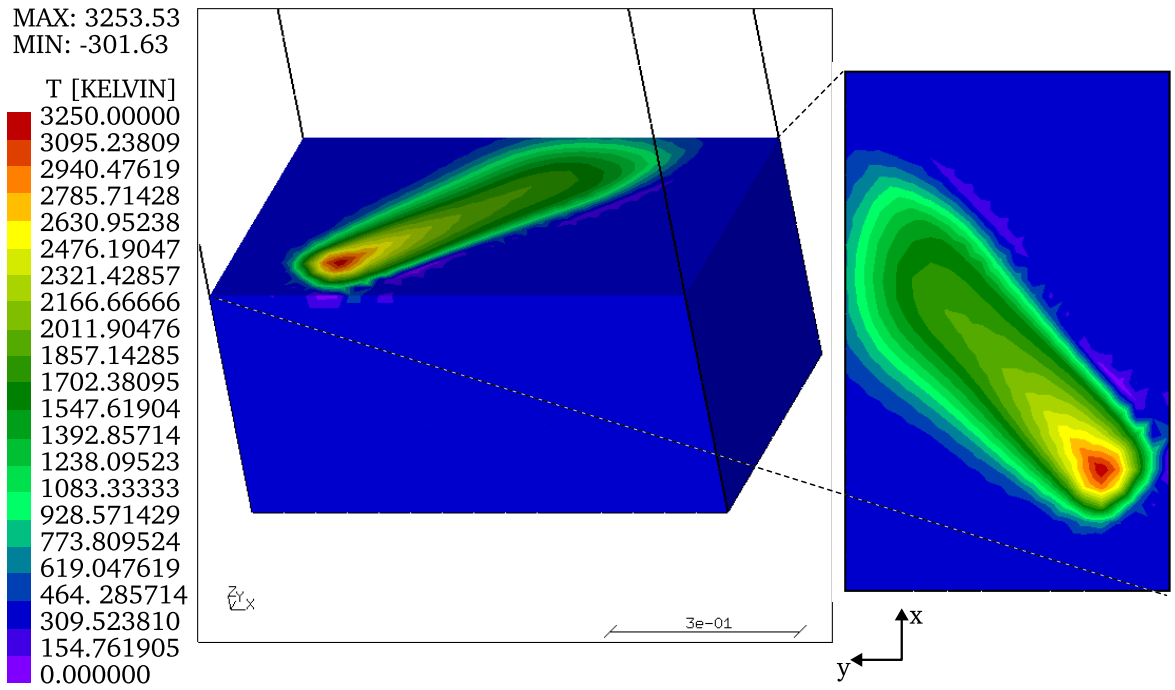


Figura 51: Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W

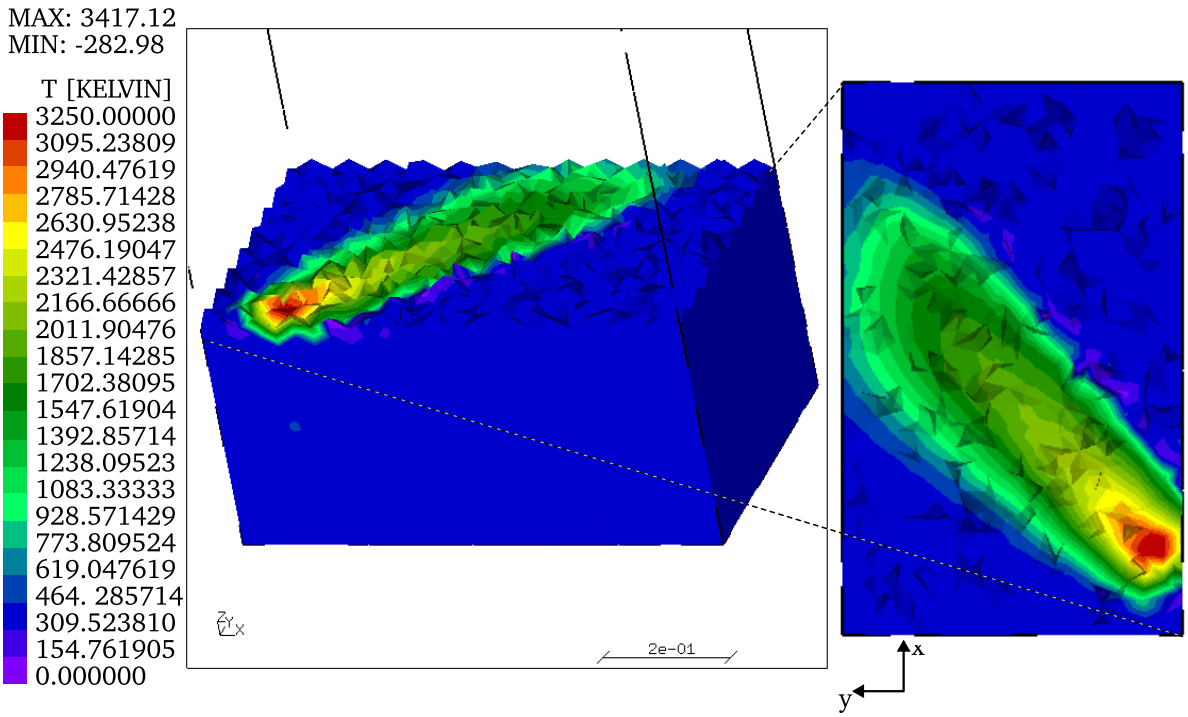


Figura 52: Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W con la malla de Hypermesh

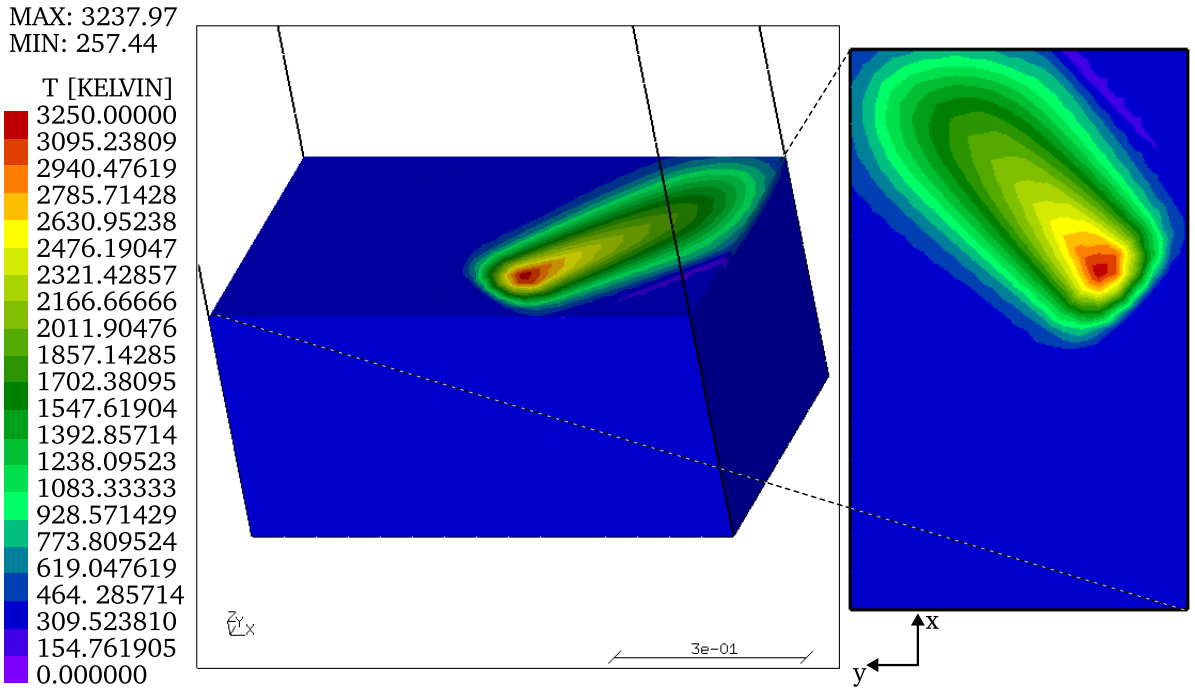


Figura 53: Resultados de temperatura [Kelvin] para una potencia de 407 W con el modelo de fuente de calor previo

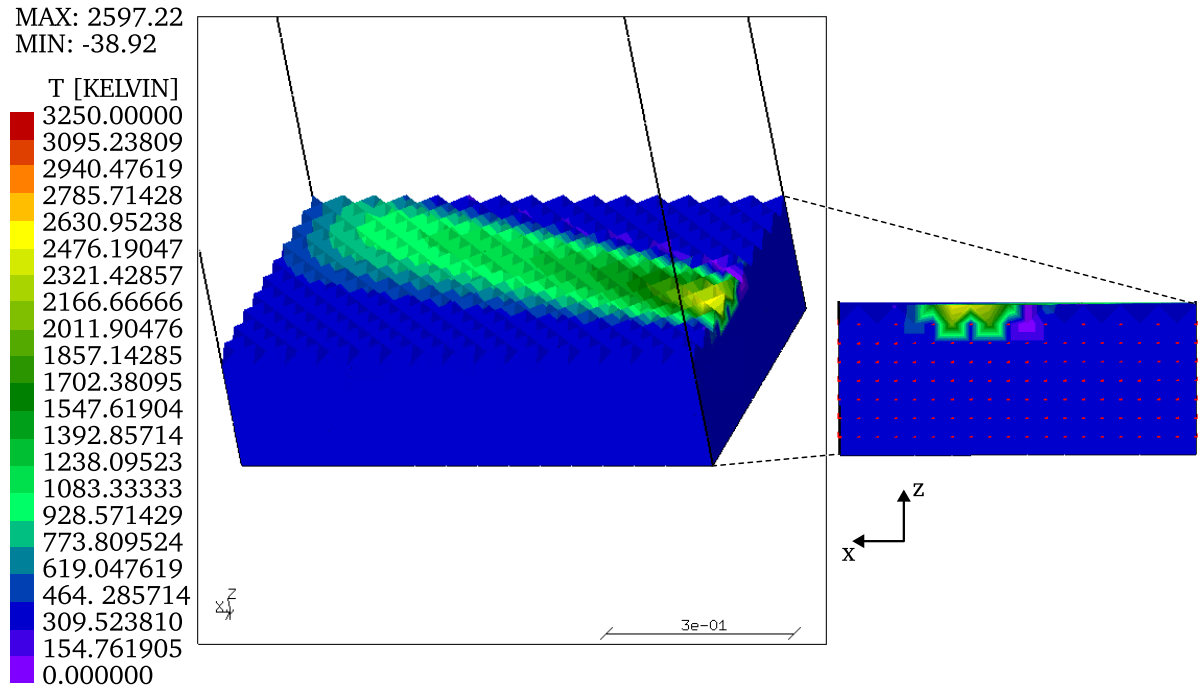


Figura 54: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la primera simulación local

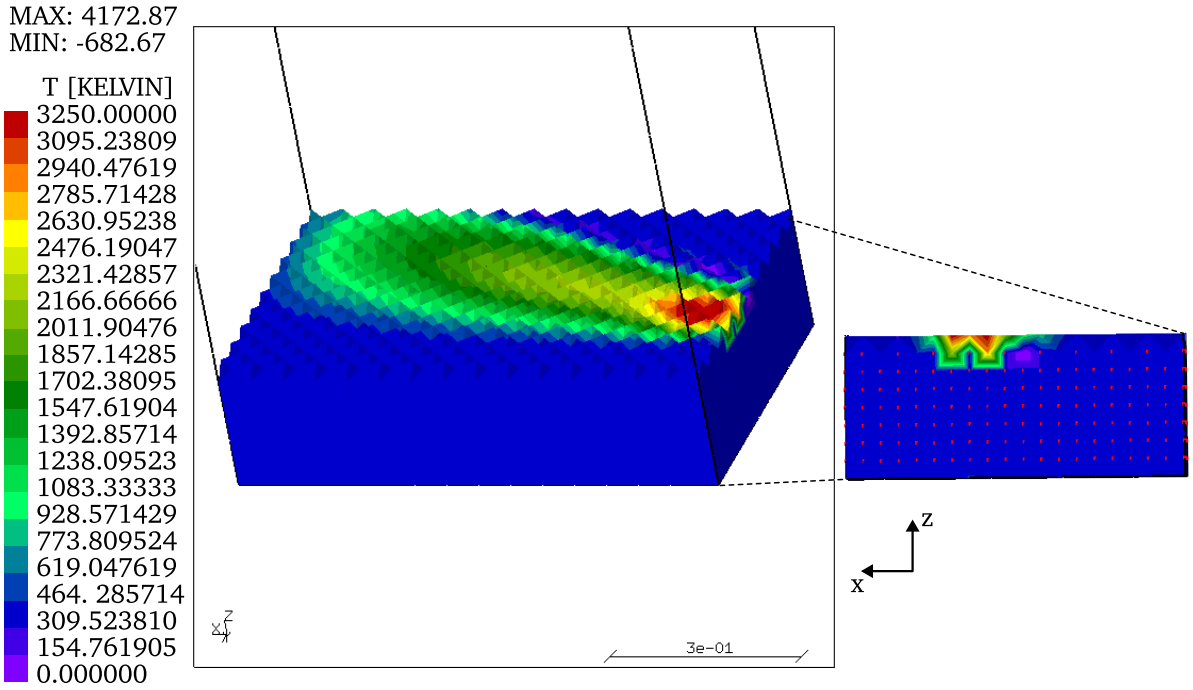


Figura 55: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la primera simulación local

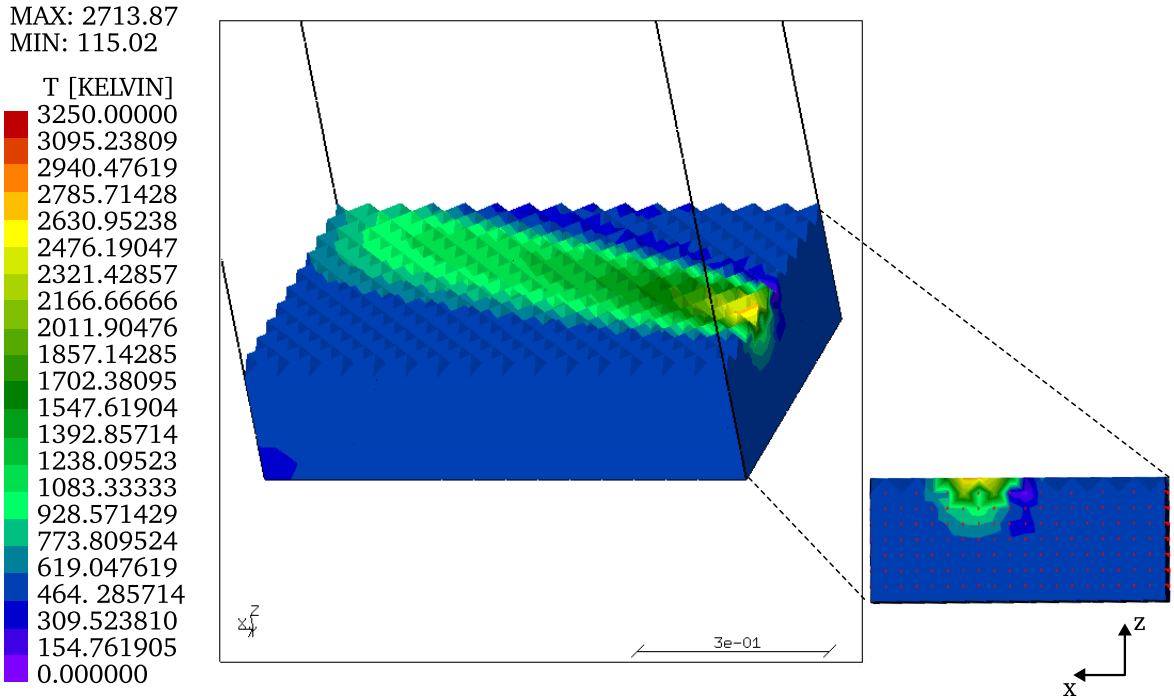


Figura 56: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la segunda simulación local

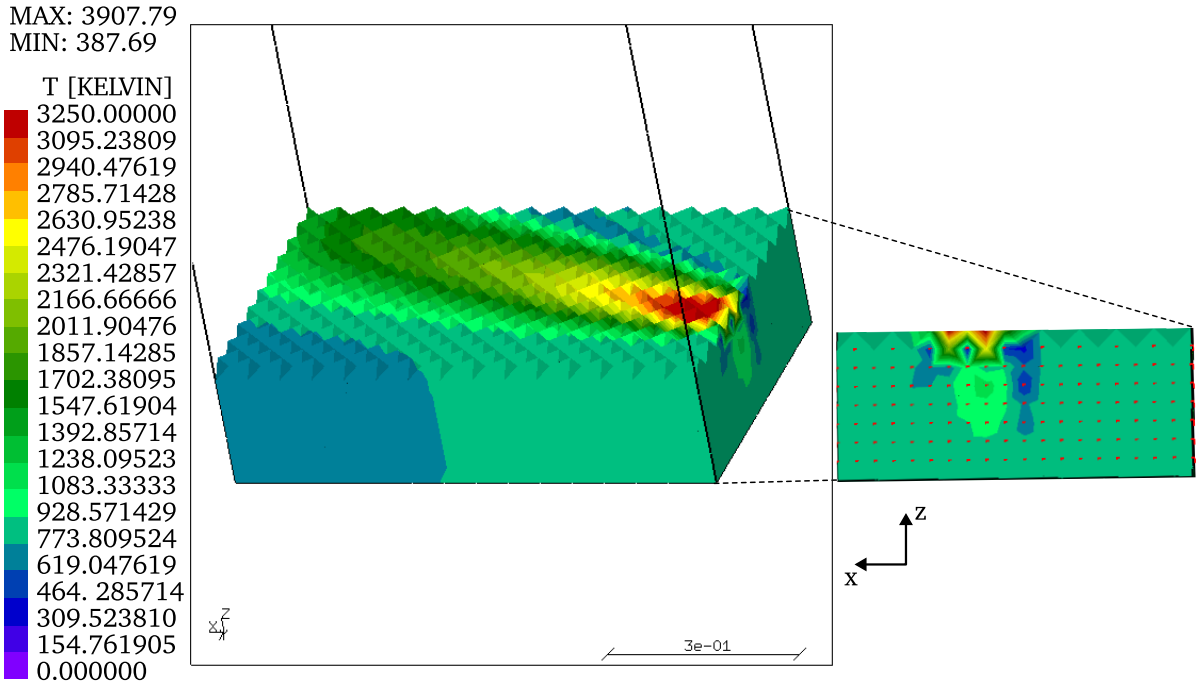


Figura 57: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local

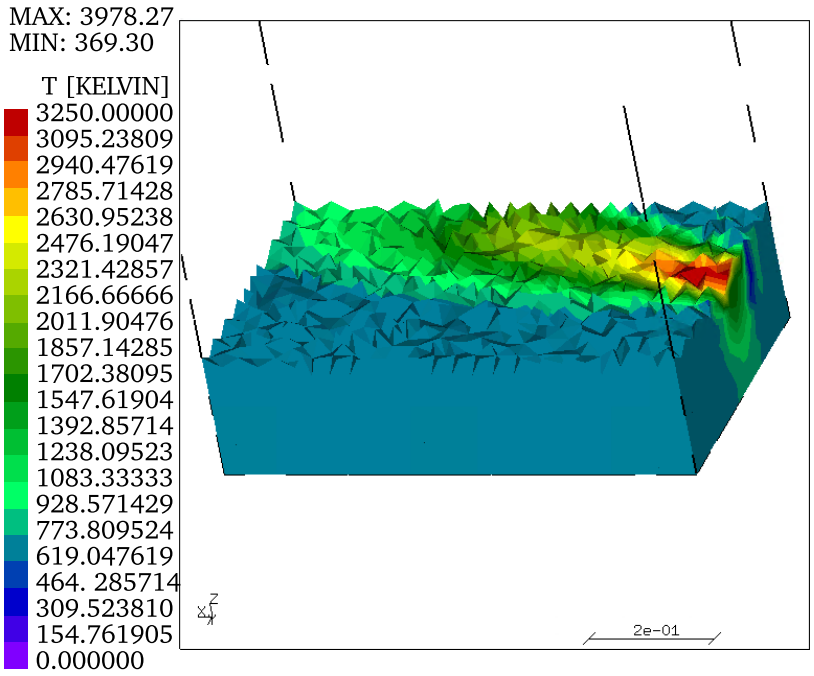


Figura 58: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local con malla de Hypermesh

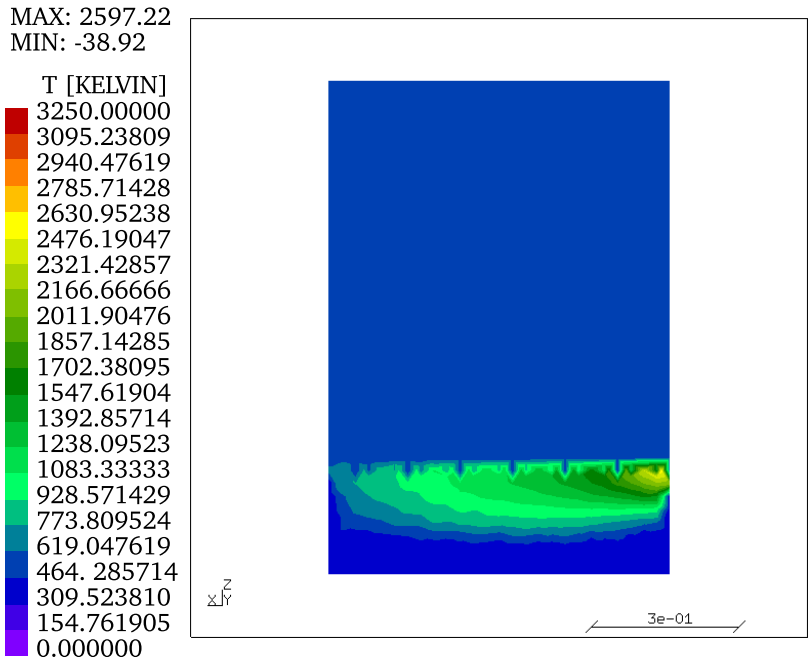


Figura 59: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la primera simulación local

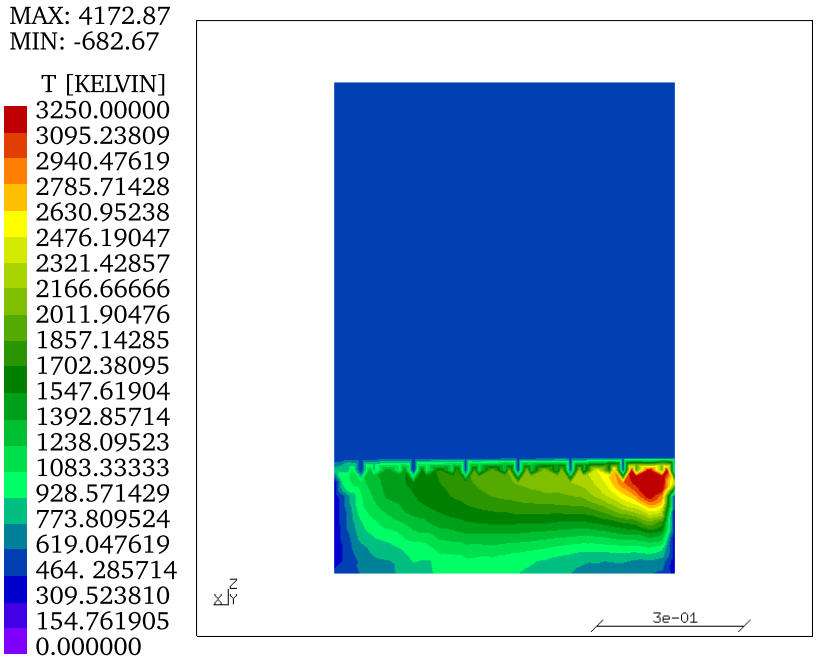


Figura 60: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la primera simulación local, sección transversal

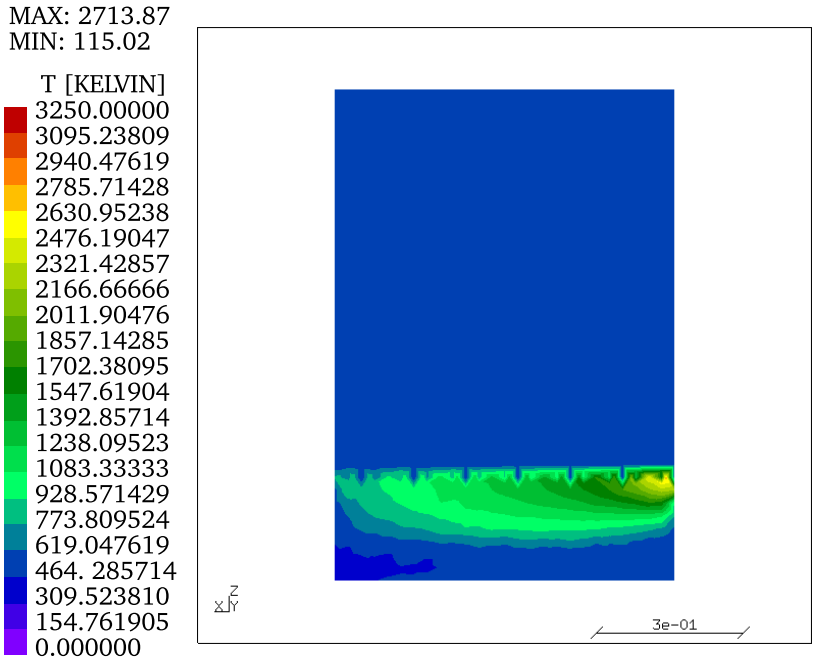


Figura 61: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 285 W en la segunda simulación local, sección transversal

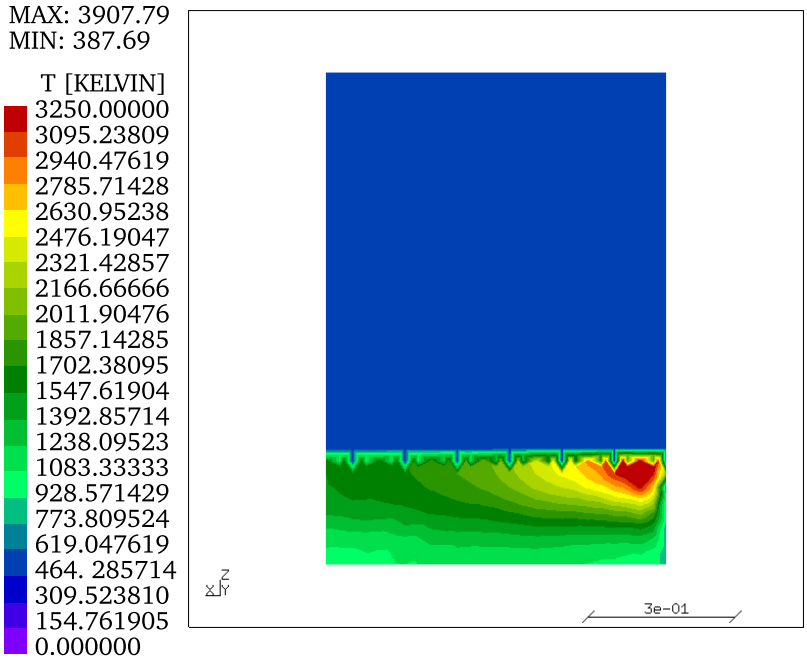


Figura 62: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local, sección transversal

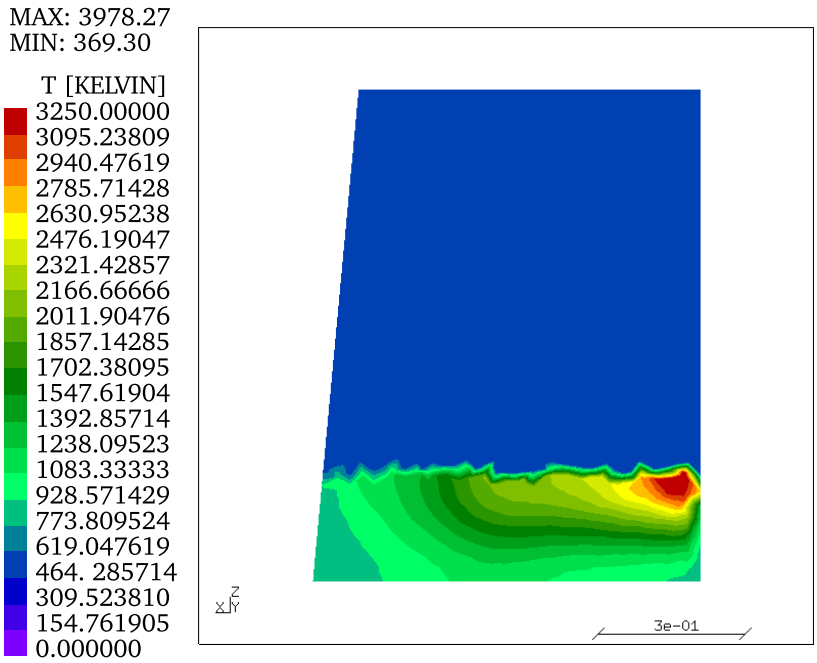


Figura 63: Resultados de temperatura [Kelvin] en el borde para una potencia de 407 W en la segunda simulación local con malla de Hypermesh, sección transversal

8. Archivos de resultado

A pesar de los resultados prometedores de la implementación del flujo de calor como BC, surgió un problema en estas simulaciones. Cuando se ejecutó la segunda simulación local para cada uno de estos casos, se detuvo en el paso 1018. Esto ocurrió no solo en estos casos, sino también durante las etapas de desarrollo de este trabajo. En los archivos de registro de esta simulación, el único mensaje que apareció fue que "no se pudo abrir el archivo .frd".

Con esta información, se tomaron múltiples enfoques para intentar resolver este problema. Se modificaron los parámetros de control de las simulaciones, se cambiaron las configuraciones de las simulaciones y se ejecutaron las simulaciones con diferentes mallas, pero el problema persistió y siempre en el mismo paso. La principal hipótesis era que en algún momento del programa, el archivo de resultados se abría pero, debido a algún error en la implementación, no se cerraba nuevamente. Sin embargo, después de depurar el programa, no se encontró el problema. La línea en la que aparecía el problema parece funcionar normalmente, el identificador del archivo se llama correctamente y nada parece haber cambiado respecto a los pasos anteriores.

Para determinar si el programa podía completarse sin inconvenientes durante la segunda simulación local, se comentó la sentencia condicional que verifica si el archivo .frd está abierto. Como resultado, el programa pudo ejecutarse hasta el final de la simulación; sin embargo, no se generaron resultados. El problema entonces parece estar relacionado con la gestión del archivo .frd para esta simulación en particular.

Una posible solución para este problema es reemplazar el archivo .frd por un archivo .h5. Este tipo de archivo está diseñado para almacenar grandes cantidades de datos de manera estructurada, mejorando así la eficiencia de su uso. Esta alternativa no pudo ser probada por el autor debido a limitaciones de tiempo.

Referencias

[1] T. DebRoy et al. "Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties". En: *Progress in Materials Science* 92 (2018), págs. 112-224. ISSN: 00796425. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2017.10.001.

[2] Sohini Chowdhury et al. "Laser powder bed fusion: a state-of-the-art review of the technology, materials, properties & defects, and numerical modelling". En: *Journal of Materials Research and Technology* 20 (2022), págs. 2109-2172. ISSN: 22387854. DOI: 10.1016/j.jmrt.2022.07.121.

[3] A Riveiro et al. "Laser additive manufacturing processes for near net shape components". En: *Near net shape manufacturing processes* (2019), págs. 105-141.

[4] Prince Valentine Cobbinah et al. "Laser Powder Bed Fusion of Potential Superalloys: A Review". En: *Metals* 11.1 (2021), pág. 58. DOI: 10.3390/met11010058.

[5] Andreas Gebhardt, Julia Kessler y Laura Thurn. *3D printing: understanding additive manufacturing*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019.

[6] Christoph Meier et al. "Thermophysical phenomena in metal additive manufacturing by selective laser melting: fundamentals, modeling, simulation, and experimentation". En: *Annual Review of Heat Transfer* 20 (2017).

[7] Bayerlein, A. "Managing Form Deviation in Laser Beam Melting by Pre-Deformation". Tesis doct. Technische Universität München, 2020.

[8] Jean-Pierre Kruth et al. "Part and material properties in selective laser melting of metals". En: *Proceedings of the 16th international symposium on electromachining (ISEM XVI)*. Shanghai Jiao Tong Univ Press. 2010, págs. 3-14.

[9] S. Legutko. "Additive techniques of manufacturing functional products from metal materials". En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 393 (2018), pág. 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/393/1/012003.

[10] Peter Mercelis y Jean–Pierre Kruth. "Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting". En: *Rapid Prototyping Journal* 12.5 (2006), págs. 254-265. ISSN: 1355-2546. DOI: 10.1108/13552540610707013.

[11] Y. Yang et al. "A semi-analytical thermal modelling approach for selective laser melting". En: *Additive Manufacturing* 21 (2018), págs. 284-297. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2018.03.002.

[12] Mahesh Mani et al. *Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes*. 2015. DOI: 10.6028/NIST.IR.8036.

[13] Eugenio Oñate. *Structural analysis with the finite element method. Linear statics: volume 2: beams, plates and shells*. Springer Science & Business Media, 2013.

[14] Carlos A Felippa. "Introduction to finite element methods". En: *University of Colorado* 885 (2004).

[15] O. C. Zienkiewicz, Robert L. Taylor y J. Z. Zhu. *The finite element method: Its basis and fundamentals*. Seventh edition. Amsterdam: Elsevier, Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN: 9781856176330.

[16] Roland W Lewis, Perumal Nithiarasu y Kankanhalli N Seetharamu. *Fundamentals of the finite element method for heat and fluid flow*. John Wiley & Sons, 2004.

[17] Guido Dhondt. "Calculix CrunchiX USER'S MANUAL, Version 2.20". En: (2022).

[18] Bernd-Arno Behrens. "Finite Element Analysis". En: *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Ed. por Sami Chatti et al. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, págs. 672-676. ISBN: 978-3-662-53120-4. DOI: 10.1007/978-3-662-53120-4_16824. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-662-53120-4_16824.

[19] Michael Schäfer. *Computational Engineering: Introduction to Numerical Methods*. Springer, 2006.

[20] Ramon Quiza, Omar López-Armas y J. Paulo Davim. "Finite Element in Manufacturing Processes". En: 2012, págs. 13-37. ISBN: 978-3-642-28084-9. DOI: 10.1007/978-3-642-28085-6_2.

[21] Chloe Allison. *Meshing in FEA: Structured vs Unstructured meshes*. 2020. URL: https://onscale.com/meshing-in-fea-structured-vs-unstructured-meshes/ (visitado 05-01-2025).

[22] A Erman Tekkaya y Celal Soyarslan. "Finite element method". En: *CIRP encyclopedia of production engineering* (2014), págs. 508-514.

[23] Mary Kathryn Thompson y John Martin Thompson. *ANSYS mechanical APDL for finite element analysis*. Butterworth-Heinemann, 2017.

[24] Dominik Goetz et al. "AscentAM: A Software Tool for the Thermo-Mechanical Process Simulation of Form Deviations and Residual Stresses in Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam". En: *Modelling* 5.3 (2024), págs. 841-860. DOI: 10.3390/modelling5030044.

[25] Klaus Wittig. "CalculiX GraphiX USER'S MANUAL, Version 2.16". En: (2019).

[26] H. Bikas, P. Stavropoulos y G. Chryssolouris. "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review". En: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 83.1-4 (2016), págs. 389-405. ISSN: 0268-3768. DOI: 10.1007/s00170-015-7576-2.

[27] K. Malukhin y K. Ehmann. "Material Characterization of NiTi Based Memory Alloys Fabricated by the Laser Direct Metal Deposition Process". En: *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 128.3 (2006), págs. 691-696. ISSN: 1087-1357. DOI: 10.1115/1.2193553.

[28] Carolin Körner, Matthias Markl y Johannes A. Koepf. "Modeling and Simulation of Microstructure Evolution for Additive Manufacturing of Metals: A Critical Review". En: *Metallurgical and Materials Transactions A* 51.10 (2020), págs. 4970-4983. ISSN: 1073-5623. DOI: 10.1007/s11661-020-05946-3.

[29] Devashish Sarkar, Angshuman Kapil y Abhay Sharma. "Advances in computational modeling for laser powder bed fusion additive manufacturing: A comprehensive review of finite element techniques and strategies". En: *Additive Manufacturing* 85 (2024), pág. 104157. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2024.104157.

[30] Christian Markus Seidel. "Finite-Elemente-Simulation des Aufbauprozesses beim Laserstrahlschmelzen". Tesis doct. Technische Universität München, 2016.

[31] Saad A. Khairallah y Andy Anderson. "Mesoscopic simulation model of selective laser melting of stainless steel powder". En: *Journal of Materials Processing Technology* 214.11 (2014), págs. 2627-2636. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.06.001.

[32] Yu-Che Wu et al. "Numerical modeling of melt-pool behavior in selective laser melting with random powder distribution and experimental validation". En: *Journal of Materials Processing Technology* 254 (2018), págs. 72-78. ISSN: 09240136. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2017.11.032.

[33] P. Scheel, E. Mazza y E. Hosseini. "Adaptive local-global multiscale approach for thermal simulation of the selective laser melting process". En: *Additive Manufacturing* 36 (2020), págs. 1-10. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101518.

[34] Snehashis Pal e Igor Drstvensek. "Physical Behaviors of Materials in Selective Laser Melting Process". En: *DAAAM International Scientific Book 2018*. Ed. por Branko Katalinic y Branko Katalinic. Vol. 17. DAAAM International Scientific Book. DAAAM International Vienna, 2018, págs. 239-256. ISBN: 9783902734198. DOI: 10.2507/daaam.scibook.2018.21.

[35] Michael F. Zaeh y Gregor Branner. "Investigations on residual stresses and deformations in selective laser melting". En: *Production Engineering* 4.1 (2010), págs. 35-45. ISSN: 0944-6524. DOI: 10.1007/s11740-009-0192-y.

[36] C. Seidel et al. "Simulation of the Laser Beam Melting Process – Approaches for an Efficient Modelling of the Beam-material Interaction". En: *Procedia CIRP* 25 (2014), págs. 146-153. ISSN: 22128271. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.023.

[37] T. A. Krol et al. "Verification of Structural Simulation Results of Metal-based Additive Manufacturing by Means of Neutron Diffraction". En: *Physics Procedia* 41 (2013), págs. 849-857. ISSN: 18753892. DOI: 10.1016/j.phpro.2013.03.158.

[38] Georg Dufter. "Thermomechanische Simulation des LaserStrahlschmelz-Prozesses auf Schichtebene". Tesis de mtría. Technische Universität München, 2021.

[39] K. Zeng et al. "Comparison of 3DSIM thermal modelling of selective laser melting using new dynamic meshing method to ANSYS". En: *Materials Science and Technology* 31.8 (2015), págs. 945-956. ISSN: 0267-0836. DOI: 10.1179/1743284714Y.0000000703.

[40] Hai T. Tran, Xuan Liang y Albert C. To. "Efficient prediction of cracking at solid-lattice support interface during laser powder bed fusion via global-local J-integral analysis based on modified inherent strain method and lattice support homogenization". En: *Additive Manufacturing* 36 (2020), pág. 101590. ISSN: 22148604. DOI: 10.1016/j.addma.2020.101590.

[41] Hai T. Tran y Albert C. To. "Cracking prediction at solid-tooth support interface during laser powder bed fusion additive manufacturing". En: *Journal of Science: Advanced Materials and Devices* 8.4 (2023), pág. 100615. ISSN: 24682179. DOI: 10.1016/j.jsamd.2023.100615.

[42] Nikola Dinev. *Implementation of a Moving Heat Source for the Powder Bed Fusion of Metals Using a Laser Beam*. Interdisciplinary project, Technische Universität München, 2025.